

Schulbiologiezentrum
Hannover

Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover
Tel: 0511-168-47665/7
Fax: 0511-168-47352
Email : schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

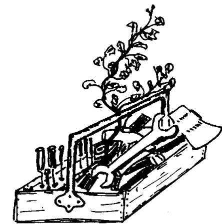
Hannover

Unterrichtsprojekte Natur und Technik

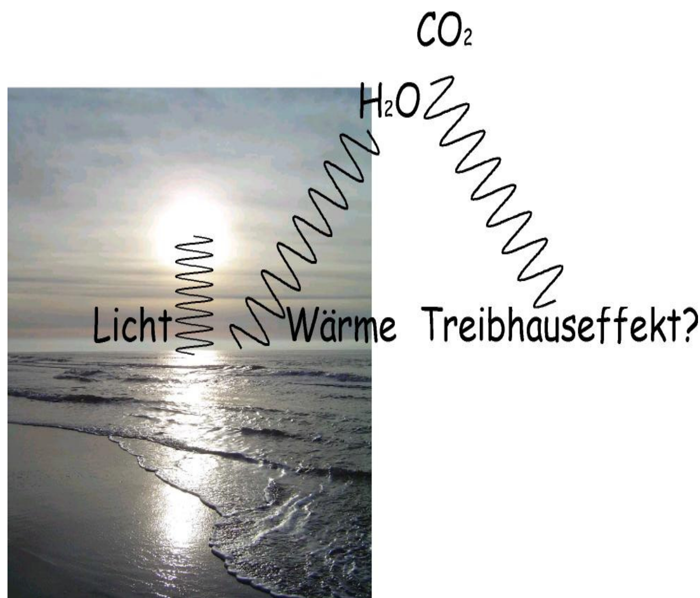
19.43

Zum Experimentieren

im Unterricht, in Arbeitsgemeinschaften und Projektwochen



CO_2 und H_2O in der Atmosphäre - Grundlagen und Experimente zum Treibhauseffekt -



Kaum ein Tag vergeht, ohne dass in Politik oder Presse der Begriff des „Treib- oder Glashauseffekts" benutzt wird und man diesen in einen Zusammenhang mit einer durch Verbrennung fossiler Energieträger menschgemachten Klimaveränderung stellt. Dies allein ist Grund genug, sich in der Schule mit diesem Thema näher zu beschäftigen. Diese Arbeitshilfe möchte einige einfache Experimente vorstellen, mit denen die physikalischen Mechanismen möglicher klimatischer Veränderungen untersucht werden können. Sie erscheint mittlerweile in der dritten und stark veränderten Auflage.

Die Erdatmosphäre in der Schule zu simulieren ist ein schwieriges Geschäft. Nicht alle Experimentiervorschläge, das Internet ist voll davon, bringen Ergebnisse und manchmal kommen sie aus ganz anderen Gründen zustande. Auch unsere Vorschläge werden nicht frei von Ungereimtheiten sein und die dritte Auflage ist mit Sicherheit nicht die letzte. Wissenschaft und Schule leben vom Dialog: Für Anregungen, Kritik und vor allem eigene Erfahrungen wären wir sehr dankbar.
Passend zum Thema haben wir die Arbeitshilfen „Wetterküche" (AH 19.6) und „Geo-Physik der Wirbelstürme" (AH 19.66) veröffentlicht.

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

Titel: CO_2 und H_2O in der Atmosphäre
Experimente zum Treibhauseffekt

Arbeitshilfe Nr. 19.43

Verfasser: Ingo Mennerich, Juni 2001
Stark veränderte Neuauflage Mai 2007

Redaktion und Layout Ingo Mennerich,

Herausgeber Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel.: 0511-168-47665/7
Fax: 0511-168-47352
Email: schulbiologiezentrum@hannover.de
Internet: www.foerderverein-schulbiologiezentrum.de

Hannover, Juli 2007

Inhalt:

Grundlagen und Zahlen
Strahlungshaushalt der Erde 2
CO_2 aus der Flasche 3
Wie viel CO_2 ist in der Atmosphäre? 4
Die Zusammensetzung der Atmosphäre 4
CO_2 im Klassenraum 4
Autofahren und CO_2 4
Mensch und CO_2 5
Zur Veranschaulichung: Würfel aus CO_2 5
Physiologische Wirkungen von CO_2, Grenzwerte 5
Der so genannte „Treibhauseffekt“ 5
Treibhauseffekt, kurzwellige und langwellige Strahlung, Absorption, Reflexion 6
Warum halten CO_2 und H_2O Wärme zurück? 10

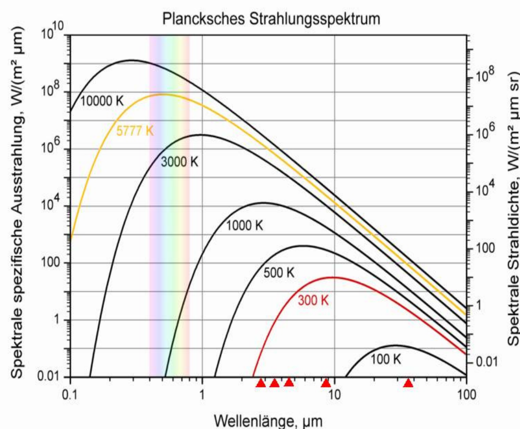
Versuche
Wärmestrahlung ist „unsichtbares Licht“ 12
Heiße Bilder 12
Strahlung, Absorption, Reflexion, Konvektion, Wärmestrahlung und Glashauseffekt 13
Wasserdampf und Wolken absorbieren Wärmestrahlung 14
Wolken machen: Kondensationskeime 16
Experimente mit der „Klimaflasche“: 17
Wolken, Wasserdampf und CO_2 halten Wärmestrahlung zurück
Demonstrationsversuch „Erde, Atmosphäre und Treibhauseffekt“ 19
Präziseres Erfassen der Absorption mit einer Thermosäule 20
„Lebensnahes“ Experiment zum CO_2-Treibhauseffekt 22
Treibhauseffekt in der Isolierkanne 23
Und warum nicht viel einfacher?

Anhang
IR-Spektren der Atmosphäre, CO_2 und H_2O, CO_2-Konzentrationen früher, usw. 25

Grundlagen

Strahlungshaushalt der Erde

Die Erde empfängt in fast 150 Millionen Kilometer Entfernung von der Sonne an der Obergrenze ihrer Atmosphäre und quer zur Einstrahlungsrichtung 1377 W/m². Dieser als Solarkonstante bezeichnete Wert wird beim Durchtritt durch die Lufthülle auf etwa 1000 W/m² (bei senkrechter Einstrahlung) reduziert. In polaren Breiten fällt das Sonnenlicht unter geringerem Winkel ein als in tropischen. Die Tageslängen variieren nach Jahreszeit und geografischer Breite. Aus allen diesem Gegebenheiten lässt sich ein Durchschnittswert von 342 pro Quadratmeter Erdoberfläche ermitteln. Ein Teil davon (107 Watt) werden z. B. an Wolken reflektiert. Die Erde strahlt die verbleibende Wärme (235 Watt/ m²) als langwellige Wärmestrahlung zurück ins All. Der Saldo sollte danach Null betragen was der Erde eine konstante, nur von Bahndaten (Entfernung von der Sonne, Exzentrität der Umlaufbahn, Neigung der Erdachse) abhängige konstante Temperatur bescheren würde.

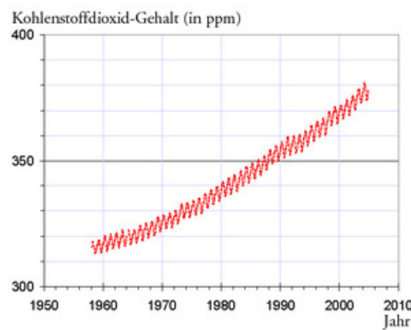


Die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von etwa 6000 K oder 5700°C und strahlt ihre Energie nach der Planckschen Strahlungsverteilung entsprechend im kurzwelligen elektromagnetischen Wellenlängenbereich ab. Das wird von unseren, durch die Evolution an die Gegebenheiten angepassten Augen als „Licht“ wahrgenommen. Wäre unsere Sonne kälter hätte ihr Licht langwelliger und damit röter. Dann würden wir auch infrarotes Licht, etwa die Signale einer Fernsehfernbedienung sehen. Die Gegenstrahlung dagegen vollzieht sich der Strahlungstemperatur der Erde entsprechend im für uns unsichtbaren langwelligen Infrarotbereich (IR).
Um die Wirkung von Treibhausgasen zu verstehen und Experimente dazu planen und durchführen zu können muss man sich mit einigen Eigenschaften und Zusammenhänge von Strahlung und Temperatur auseinandersetzen und die Wirkungsweise von Absorption verstehen.
Treibhausgase, im positiven wie negativen Sinne verschieben dieses Gleichgewicht. Ohne sie wäre es auf der Erde mit einer Strahlungstemperatur -18°C frostig kalt und das an die Eigenschaften des Wassers gebundene Leben nicht möglich. Tatsächlich beträgt die globale Strahlungstemperatur +15°C.
In der Atmosphäre wichtige Treibhausgase sind Wasser (H_2O) und CO_2.
Da das CO_2 in der Klimadiskussion, weil zusätzlich anthropogen erzeugt, zur Zeit die größte Rolle spielt sei hier zunächst darauf eingegangen.

Wie viel CO_2 ist in der Flasche?

CO_2 wird in der Schule meistens in 50 oder in 27 Liter Stahlflaschen gelagert. Sie stehen unter hohen Druck (z.B. bei Linde 57,25 bar) und enthalten 37,5 bzw. 20 kg CO_2.
Wie viel Gas kann man daraus entlassen?
1 mol eines beliebigen Gases füllt bei Normaldruck (1013 hPa) und einer Temperatur von 20°C ein Volumen von 22,4 Liter.
1 Mol CO_2 hat eine Masse von 44 g 1 Kilogramm (1000 g) CO_2 enthält etwa 22.7 mol (1000/44). 1 kg CO_2 entspricht also 22,7 x 22,4 = 509.1 Liter Gas.
Das sind fast 51 Haushaltseimer voll.
Eine Flasche mit 37,5 kg Inhalt ergibt 19091.25 Liter Gasvolumen, 20 kg entsprechen 10182 Litern. Das füllt Quader von respektive 26,7 bzw. 21,7 m Kantenlänge.

Wie viel CO_2 ist in der Atmosphäre?



Schon viel zu viel, sagen einige.
Der derzeitige durchschnittliche Gehalt (2007) liegt bei 381 ppm (parts per million = Teile auf eine Million Teile) oder 0,0381 Volumen-%. Die CO2-Konzentration, obwohl insgesamt gering, ist seit Beginn der Industrialisierung gestiegen. Sie hat in den letzten 10000 Jahren vor der Industrialisierung 280 ppm betragen.
Bezogen auf einen 1 x 1 x 1 m großen Würfel (1 m^3 oder 1000000 cm^3) sind das 381 cm^3.
Das ist ein Würfel mit der Kantenlänge 7,25 cm.
Heruntergerechnet auf das Volumen eines gewöhnlichen Haushaltseimers (10 Liter) macht das 3,81 cm^3. Das ist ein Würfel mit 1,56 cm Kantenlänge. 280 ppm entsprechen einem Würfel von 2,8 cm^3 (Kantenlänge 1,41 cm). Der Zuwachs von etwas über 100 ppm oder 0,01 % liegt, bezogen auf den Haushaltseimer, bei 1 cm^3.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Zusammensetzung der (trockenen) Erdatmosphäre gibt folgende Tabelle wieder (aus K.-H. Ludwig: Eine kurze Geschichte des Klimas, Verlag C.H. Beck, München 2006):

Gas	Volumen-%	Gas	Volumen-%
Konstante Gruppe		Variable Gruppe	
Stickstoff (N_2)	78,084	Wasserdampf (H_2O)	0 - 7
Sauerstoff (O_2)	20,948	Kohlendioxid (CO_2)	0,01 - 0,1 (2007: ∅ 0,0381 %)
Argon (Ar)	0,934	Ozon (O_3)	0 - 0,01
Neon (Ne)	0,0018	Schwefeldioxid (SO_2)	0 - 0,0001
Helium (He)	0,000524	Stickstoffdioxid (NO_2)	0 - 0,000002
Methan (CH_4)	0,0002		
Krypton (Kr)	0,000114		
Wasserstoff (H_2)	0,00005		
Distickstoffoxid/ Lachgas (N_2O)	0,00005		
Xenon (Xe)	0,0000087		

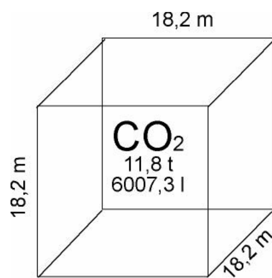
CO_2 im Klassenraum

Wie viel CO_2 „liegt“ im Klassenraum?
Nehmen wir eine Raumhöhe von 3 m an: Sollte das in Bezug auf andere Luftbestandteile schwere Gas eine Schicht am Boden bilden wäre diese Schicht 0,114 cm dick. Sie ist seit der Industrialisierung um 0,03 cm dicker geworden.

Autofahren und CO_2

1 Liter Diesel führt zu 2,62 kg CO_2 also 26,2 g CO_2/km
1 Liter Benzin entspricht 2,32 kg CO_2 also 23,2 g CO_2/km
Ein durchschnittlicher Dieselverbrauch von 5,6 Liter entspricht also 131 g CO_2/km
Der von der Europäischen Kommission vorgeschlagene Richtwert von 130 g CO_2 pro km entspricht einem Verbrauch von 5,0 l/100 km Diesel bzw. 5,6 l/100 km Benzin.
Das Molekulargewicht von Kohlenstoff (C) ist 12, von Sauerstoff (O) 16 und somit von Kohlendioxid 44. 1 mol CO_2 ist 44 g. 1 mol eines Gases entsprechen unter Normalbedingungen 22,4 Liter. 130g CO_2/km sind 2,98 mol CO_2. 2,98 mol CO_2 sind 66,7 Liter.
Daraus lässt sich leicht der CO_2-Menge einer Autofahrt berechnen.

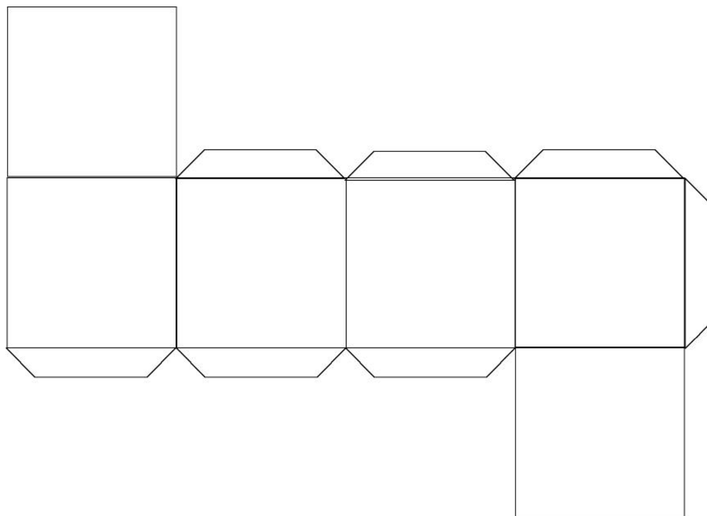
Mensch und CO_2



Jeder Hannoveraner produziert 11,8 Tonnen CO_2 pro Jahr
(HAZ 15. März 2007)
11,8 Tonnen Gas, das nicht viel schwerer als Luft ist.
11,8 Tonnen (11800 kg) sind 268182 mol CO_2 oder 6007273 Liter oder 6007,3 m^3
Das entspricht einem Würfel von fast 18,2 m Kantenlänge
Nach anderen Angaben hat 1 kg CO_2 ein gerundetes Volumen von 0,5155 m^3. Das ergäbe 6082,9 m^3!

Zur Veranschaulichung: Würfel aus CO_2

Ein Würfelschnittmuster



Physiologische Wirkungen von CO_2, Grenzwerte

Angaben nach WIKIPEDIA:

CO_2-Konzentrationen (Vol-%) in :Luft und Auswirkungen auf den Menschen:

- 0,038 %: Derzeitige Konzentration in der Luft
- 0,15 %: *Hygienischer Innenraumluftrichtwert* für frische Luft
- 0,3 %: MIK-Wert, unterhalb dessen keine Gesundheitsbedenken bei dauerhafter
- Einwirkung bestehen
- 0,5 % (9 g/m^3): MAK-Grenzwert für tägliche Exposition von acht Stunden pro Tag
- 1,5 %: Zunahme des Atemzeitvolumens um mehr als 40 %.
- 4 %: Atemluft beim Ausatmen
- 5 %: Auftreten von Kopfschmerzen, Schwindel und Bewusstlosigkeit
- 8 %: Bewusstlosigkeit, Eintreten des Todes nach 30–60 Minuten

Der so genannte „Treibhauseffekt“

Der Treibhauseffekt ist im Gewächshaus, Wintergarten oder in einem in der Sonne abgestellten Auto erfahrbar. Die Glaswände lassen das Sonnenlicht hinein, hindern aber die entstehende Wärme und Wärmestrahlung daran, in die Umgebung abzufließen, was den eingeschlossenen Luftkörper unter Umständen aufheizt. Entscheidend im Treibhaus ist – im Gegensatz zur Atmosphäre - dass der vertikale Luftaustausch (Konvektion) unterbunden wird.

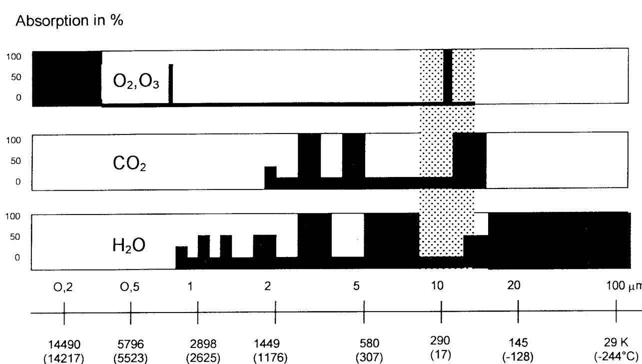
Wenn in der Klimadiskussion von „Treibhausgase“ (vereinfacht neuerdings auch „Klimagase“ oder „Klimakiller“ genannt) gesprochen wird, geht es um Gase, die eine dem Glas ähnliche Wirkung haben. „Treibhausgase“ sind (gasförmiger!) Wasserdampf, CO_2, Methan (CH_4) und die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKWs. Sie sind für kurzwelliges (sichtbares) Licht nahezu durchlässig, was nichts anderes heißt, als das sie für unsere Augen unsichtbar sind. Die langwellige (für uns unsichtbare) Wärmestrahlung dagegen wird in bestimmten Wellenlängenbereichen absorbiert und damit zurückgehalten. So bleibt die an der Erdoberfläche entstehende Wärme gewissermaßen in der Atmosphäre stecken und es kommt zum Wärmestau.
Der Wasserdampf und die (auskondensierten!) Wolken, deren Wärme haltende Wirkung spätestens am Morgen einer sternklaren Winternacht spürbar wird, werden in der öffentlichen Diskussion oft vergessen. Dabei übertrifft das Wärmerückhaltevermögen des Wasserdampfes die klimatische Wirksamkeit des CO_2s wahrscheinlich bei weitem. Genauso wird in der Klimadiskussion leicht unterschlagen, dass die Erde ohne das Vorhandensein von CO_2 und Wasserdampf mit etwa –18°C unerträglich kalt wäre und dass es geologische Epochen mit wesentlich höherem CO_2-Spiegel (etwa zu Beginn des Karbons) als heute gegeben hat. Globale Eiszeiten zu Beginn des Perm fielen mit Zeiten dramatischen CO_2-Entzuges durch die gewaltige Photosyntheseleistung im vorhergehenden feuchtwarmen Karbon zusammen.
In welchem Maße die, von vielen Meteorologen festgestellte Erwärmung der Atmosphäre tatsächlich auf das Konto der „Klimagase“ geht (und damit eine Folge der Nutzung fossiler Energieträger ist) ist unter Wissenschaftlern nicht endgültig entschieden. Tatsache ist, dass allein der CO_2-Gehalt der Atmosphäre zwischen 1750 und 1994 von 0,028 auf etwa 0,036 % gestiegen ist. Bekannt ist aber auch, dass das Erdklima schon immer massiven Schwankungen unterworfen war und keine anthropogenen Ursachen dafür ins Feld geführt werden können (langfristig sich ändernde Exzentrität der Erdumlaufbahn und Neigung der Erdachse, Bewegung der Kontinente durch Plattentektonik, dadurch veränderte Meeresströmungen usw.).
Ziel der vorliegenden Arbeitshilfe ist es, in einer Reihe einfacher Experimente die Treibhauswirkung von Glas, Wasserdampf und CO_2 zu untersuchen. Dabei werden sich die Schüler mit Aspekten der elektromagnetischen Strahlung, der Transmission, Absorption, Streuung und Reflexion von Licht bzw. Wärmestrahlung auseinandersetzen. Es ist deshalb sinnvoll, den eigentlichen Versuchen eine „Sachanalyse“ zu diesen Aspekten voranzustellen.
Mit dieser Arbeitshilfe möchten wir einen Beitrag zur Versachlichung leisten und Lehrer wie Schüler anregen, einige der immer wieder diskutierten Aspekte selbst zu untersuchen. Weiterhin möchten wir Kritikfähigkeit an der Methodik und Aussagefähigkeit von Experimenten fördern. Wir würden uns freuen, wenn aus den hier vorgestellten Ideen neue und bessere Ideen würden.
Einige der vorgeschlagenen Experimente werden zu wenig befriedigenden Ergebnissen führen. Wenn zum Beispiel das Hineinblasen von 100% CO_2 aus einer Druckflasche in eine von der Sonne beleuchtete und luftdichte Glasglocke nicht, wie vielleicht erwartet, zu einem deutlichen Temperaturanstieg in der Glocke führt, kann das jedoch zu der Erkenntnis führen, dass vermeintlich einfache und populäre Allgemeinplätze doch komplizierter als angenommen sind. Ein nicht vorhergesagtes Ergebnis kann aber neugierig machen und anregen, das Experiment neu zu durchdenken.
Hinweisen möchten wir darauf, dass einige der erforderlichen Materialien sind im Schulbiologiezentrum Hannover auszuleihen.

Treibhauseffekt, kurzwellige und langwellige Strahlung, Absorption, Reflexion
Der atmosphärische Treibhauseffekt beruht auf der Absorption von Wärmestrahlung durch Gasmoleküle, in erster Linie H_2O, CO_2, CH_4, N_2O und FCKWs.
Die Wärmestrahlung ist, genau wie das Licht-, Rundfunk- oder Mikrowellen eine elektromagnetische Schwingung, die durch Eigenschaften wie Wellenlänge bzw. Frequenz geprägt ist. Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts (-273° C) gibt Wärmestrahlung ab. Deren Energie und Wellenlänge (bzw. Frequenz) hängt von der

Temperatur des strahlenden Körpers ab. Dieser Zusammenhang wird durch das WIENsche Verschiebungsgesetz ausgedrückt:

$$\lambda_{max} \text{ (Wellenlänge)} = 2{,}898 \text{ mm} : T$$

λ_{max} bezeichnet die Wellenlänge, bei der das Strahlungsmaximum auftritt. T ist die Temperatur in Kelvin (0 Kelvin = -273° C).
Die Temperatur der Sonnenoberfläche (ca. 6000 K) entspricht einem Strahlungsmaximum bei einer Wellenlänge von -> 2,898 mm : 6000 K = 0,000483 mm = 483 nm.
Strahlung dieser Wellenlänge nehmen unsere Augen als Licht der Farbe gelbgrün war.
Eine von der Sonne auf 27°C (= 300 K) erwärmte Landoberfläche gibt eine infrarote und für uns nicht sichtbare Strahlung mit einem Intensitätsmaximum von 0,00966 mm = 9660 nm = 9,66 µm ab. Strahlung im Nanometerbereich gilt als kurzwellig (nicht zu verwechseln mit der viel langwelligeren „Kurzwelle" im radiotechnischen Sinne!). Wellenlängen im Mikrometerbereich werden als langwellig bezeichnet. Für sie gilt auch der Begriff „Infrarotstrahlung", weil die Wellenlänge unter der Wellenlänge des noch sichtbaren roten Lichts liegt.
Trifft elektromagnetische Strahlung auf Atome, Moleküle oder Körper, so kann die Strahlungsenergie unter bestimmten Bedingungen auf die Materie übertragen werden: Es kommt zur Absorption, Atome oder Moleküle werden „angeregt". Die Energieübertragung kann dazu führen, dass Elektronen der Atomhülle auf ein höheres Energieniveau gehoben werden oder dass die Atome bzw. Moleküle selbst in Schwingungen versetzt werden. Die so angeregten Elektronen, Atome oder Moleküle fallen nach einer bestimmten Zeit unter (langwelligerer) Strahlungsabgabe in ihren energieärmeren Grundzustand zurück. Ein populäres Beispiel sind fluoreszierende Textmarker oder „Weißmacher" in Waschmitteln, deren Farbstoffe unsichtbares UV-Licht absorbieren und als längerwelliges, energieärmeres sichtbares Licht abgeben .Die Fluoreszenzstrahlung bevorzugt keine bestimmte Richtung.
Damit es zur Absorption kommt, muss die Wellenlänge bzw. Frequenz der Strahlung aus quantenphysikalischen Gründen mit bestimmten „Resonanzeigenschaften" des Atoms oder Moleküls übereinstimmen. Sonst wird die Strahlung ohne Energieübertragung gestreut, reflektiert oder hindurchgelassen. Gasmoleküle haben jeweils „arteigene" Resonanzmuster, die in der Gasspektroskopie zum Nachweis dieser Gase benutzt werden.



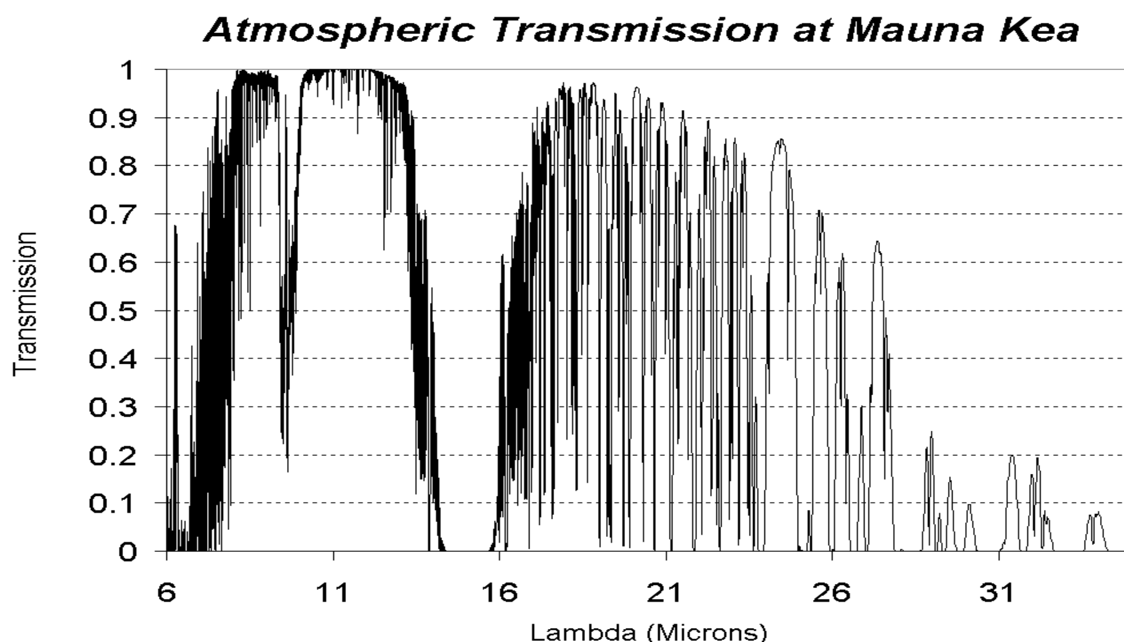
Wir beschränken uns auf die Absorptionsspektren der wesentlichsten in der Atmosphäre vorkommenden Gase hervor: Ozon absorbiert fast ausschließlich kurzwellige Strahlung im UV-Bereich, CO_2 und H_2O dagegen langwellige Wärmestrahlung. Die Absorptionskurven von CO_2 und H_2O sind, in stark vereinfachter Form, in der folgenden Abbildung widergegeben (nach Häckel, Meteorologie). Den Wellenlängen sind die nach dem WIENschen Verschiebungsgesetz entsprechenden Temperaturen in Kelvin bzw. in °C (Klammerwert) zugeordnet.
Die Absorptionsmuster machen deutlich, welchen Anteil CO_2 und H_2O bei Temperaturen, die für die Erdatmosphäre typisch sind, zurückhält. Dieser Bereich ist punktiert unterlegt.
(Grafik oben nach: Hans Haeckel, Meteorologie, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1999)

Andere Darstellungen machen deutlich, dass CO_2 im IR-Bereich zwei ausgeprägte und scharf begrenzte Absorptionsbanden hat und zwar bei 15 und 4 Mikrometer. Die nach dem WIENschen Verschiebungsgesetz ($T = 2{,}898 \text{ mm} : \lambda$) zu diesem Absorptionsmuster passenden Temperaturen liegen bei 193 bzw. 725 K (- 81° C bzw. 452° C).

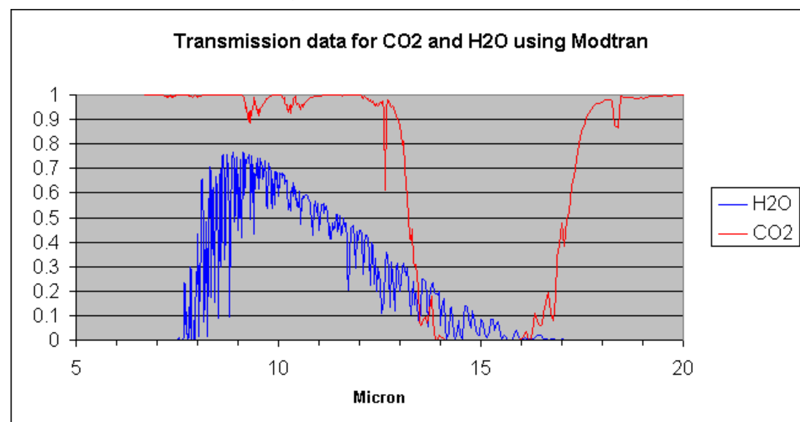
Die zu einem Wellenlängenmaximum passende Temperaturkurve hat immer eine steilflankige und kurze „warme“ (kurzwellige) und eine flacher und lang auslaufende kalte (langwellige) Seite. Weiterhin fällt auf, dass die Maxima mit Temperaturwerten korreliert sind die für unsere Erdatmosphäre nur bedingt typisch sind. Zwar reichen die Flanken in für die Erde typische Temperaturen hinein, dennoch bleiben auf den ersten Blick viele Fragen offen.
Eins ist sicher: Könnten wir unsere Experimente bei den Temperaturen durchführen bei denen CO_2 resonant ist würden sie viel eindeutiger ausfallen.

Für die spektrale Durchlässigkeit der Erdatmosphäre interessiert sich die Infrarotastronomie bei ihrer Suche nach Objekten die zu kalt sind um sichtbares Licht auszustrahlen, z.B. so genannten „Braunen Zwergen“ oder Planeten anderer Sonnensysteme. Messungen auf dem Mauna Kea (Hawaii) ergaben im nahen und mittleren IR-Bereich folgendes Bild:

Quelle: Insituto de Astroficica de Canarias, **www.iac.es/project/CCam/Atmosphere.htm**

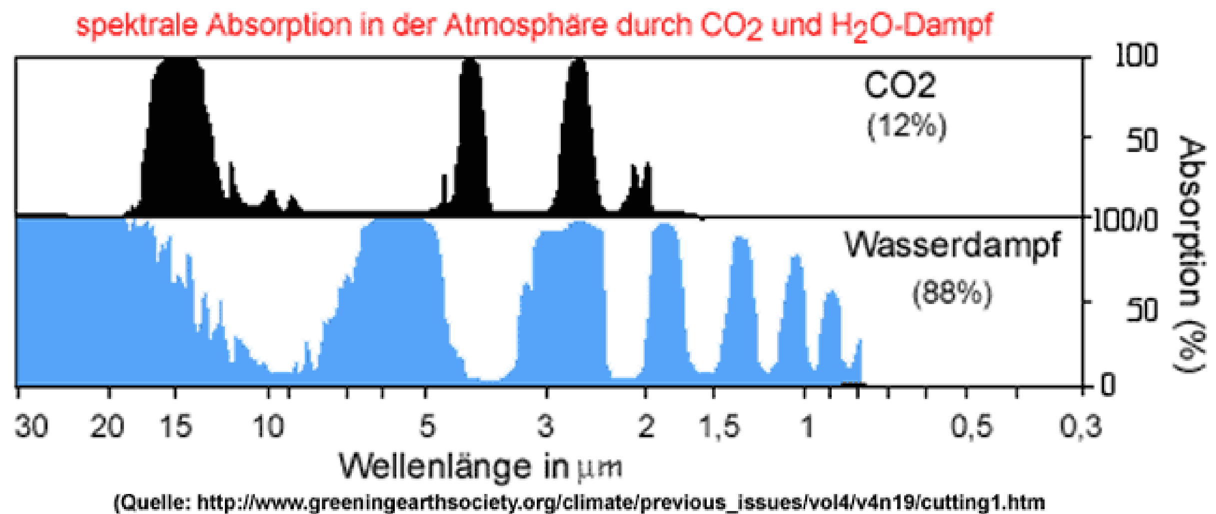


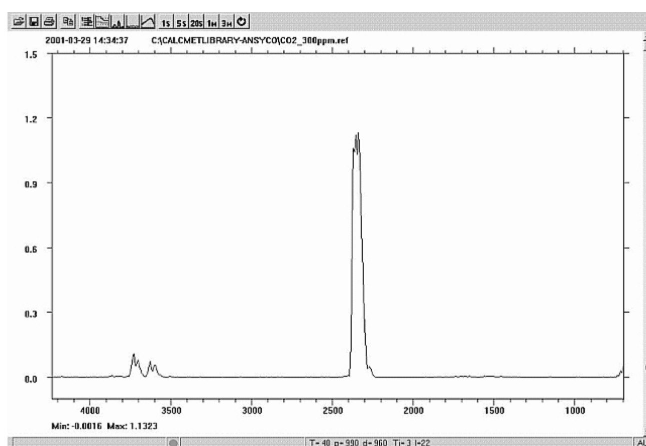
Das Transmissionsspektrum zeigt die zum langwelligen Bereich abfallende, von zwei großen Banden bei 6 und 15 µm durchbrochene Durchlässigkeit der Atmosphäre.



Das Spektrum links gibt Aufschluss darüber, welche Anteile CO_2 und H_2O daran haben. Deutlich wieder die Absorptionsbande von CO_2bei 15 mm. H_2O absorbiert im nahen IR-Bereich bis etwa 9 µm 100% der Strahlung. Bei 10 µm wird 75% hindurchgelassen, danach immer weniger. Ab 15 µm ist die Absorption total.

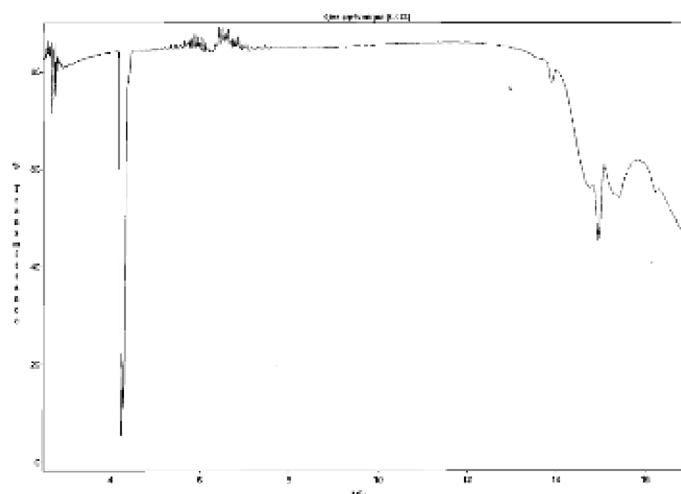
Im Internet lassen sich viele auf die Erdatmosphäre bezogene Absorptionsspektren finden:



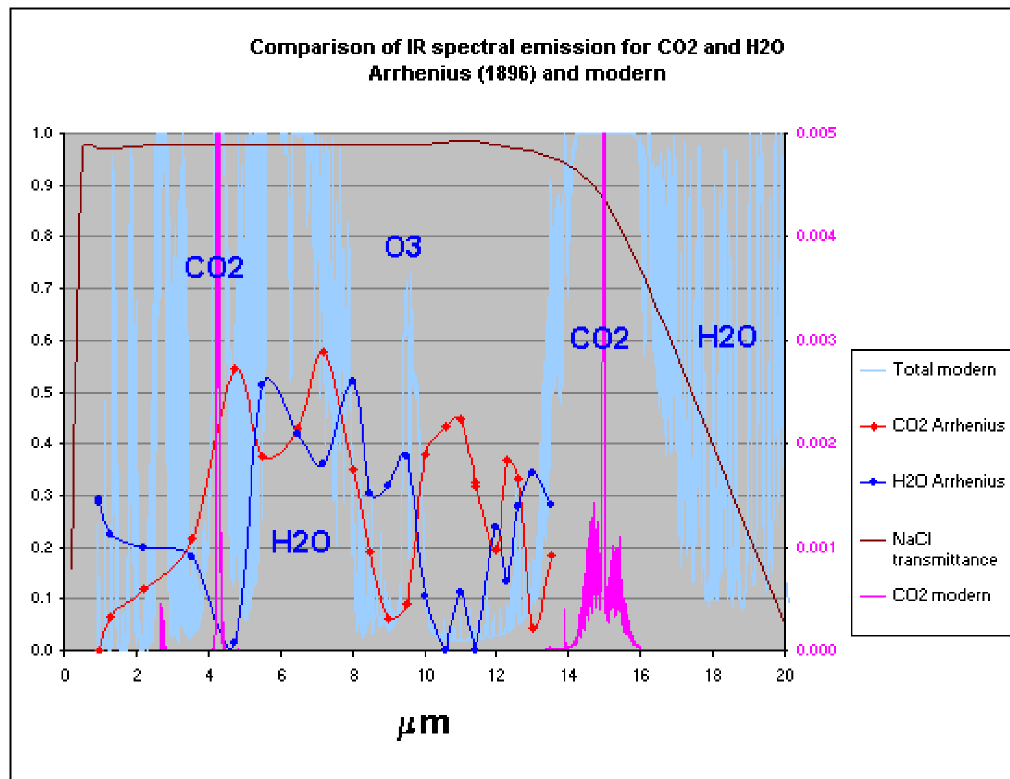


CO_2 lässt sich auch isoliert unter Laborbedingungen betrachten: (aus Spektrensammlung von www.ansyco.de) Die Analyse erfolgte mit 300 ppm CO_2. Der scharfkantige „Peaks“ macht deutlich, dass das Gas nur für bestimmte und schmale Bereiche resonant ist. Achtung: Die Skala des hier abgebildeten Spektrums gibt, wie in der Spektroskopie üblich, die Wellenzahl, d. h. den Kehrwert der Wellenlänge in cm an. Die Absorptionsbande zwischen 2000 und 2500 entspricht der Wellenlänge 4 µm.

Die folgende Kurve gibt die Durchlässigkeit von CO_2 für Infrarote Wellenlängen wieder: CO_2 absorbiert bei 2 µm, sehr stark aber schmalbandig bei 4 µm und dann im Bereich oberhalb von 14 µm. Quelle: Laboratoire de Sciences de la Matière, ENS Lyon, www.ens-lyon.fr



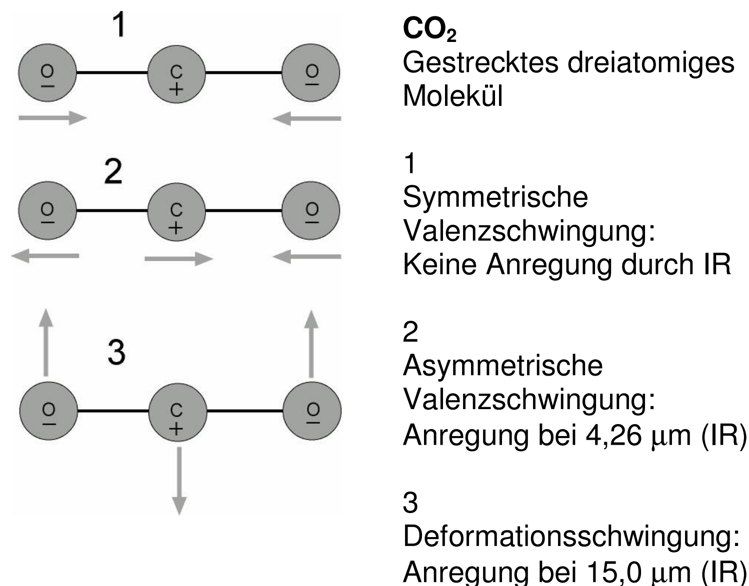
Die nachstehende Kurve stellt die von Arrhenius (1896) berechneten Absorptionskurven von CO_2 und H_2O heutigen Messwerten gegenüber. Hier wird deutlich, dass Arrhenius dem CO_2 ein viel breiteres Absorptionsmuster zusprach als heute messbar ist.
Die Zahlenwerte die Arrhenius auf der Basis der Boltzmann-Gleichung berechnete finden sich im Anhang



Warum halten CO_2 und H_2O Wärme zurück?

Kohlenstoffdioxid ist ein dreiatomiges gestrecktes Molekül.
Obwohl die Valenzdoppelbindungen zwischen dem Kohlenstoff und den beiden Sauerstoffatomen gesättigt sind und das Molekül nach außen hin elektrisch neutral ist weisen die Sauerstoff-„Enden“ gegenüber dem zentralen Kohlenstoffatom einen negativen Ladungsüberschuss auf. CO_2 hat also elektrischen Dipolcharakter. Im Grundzustand ist die Ladungsverteilung symmetrisch.
Wird ein Molekül von „passender“ elektromagnetischer Energie getroffen gerät es in Schwingungen. „Passend“ heißt grob vereinfachend, dass die zugeführte Energie mit den Resonanzeigenschaften des Moleküls übereinstimmen muss. Als der Mechanik entlehnte Analogie mag das Beispiel eines auf der Schaukel sitzenden Kindes gelten. Die Schaukel gerät nur in Schwung wenn sie zu bestimmten Zeitpunkten und mit einer bestimmten Energie angeschoben wird. Noch einmal stark vereinfachend kann man sich ein CO_2-Molekül als drei durch zwei Federn miteinander verbundene Kugeln vorstellen. Wird das Molekül auf eine bestimmte Weise angestoßen, schwingen die drei Kugeln, von den Resonanzeigenschaften der Federn und der Kugeln bestimmt, hin und her. Sie haben dabei die von außen einwirkende Energie („Anschub“) in Bewegungsenergie aufgenommen.
Auf der atomaren und molekularen Ebene gibt es zwei Arten von Schwingungen: Streckschwingen führen zur Veränderung des Abstands der Atome, Deformationsschwingungen zur Veränderung des Bindungswinkels zwischen den Atomen.
Bei Schwingungen werden die Ladungen („Dipolmoment“) im Molekül rhythmisch verschoben. Bei drei- und mehratomigen Molekülen führt dies zu einer Asymmetrie in der Ladungsverteilung. Bei zweiatomigen Molekühlen bleibt die Ladungsverteilung symmetrisch.

Die Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) kann von elektromagnetischer Strahlung nicht zu Schwingungen angeregt werden, im Gegensatz zu Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2).
Die Molekülschwingungen auslösenden Wellenlängen liegen im Infrarotbereich (Wärmestrahlung). Die Moleküle absorbieren bestimmte Wellenlängen der IR-Strahlung, das heißt, sie entziehen der Strahlung Energie, speichern die Energie in Form von Schwingungen und geben sie unter Energieverlust wieder ab (Relaxation).
Als mögliche „Überträger" von Wärmeenergie kommen Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle in Betracht, die die Schwingungsenergie bei den häufigen Kollisionen mitnehmen.



CO_2
Gestrecktes dreiatomiges Molekül

1
Symmetrische Valenzschwingung:
Keine Anregung durch IR

2
Asymmetrische Valenzschwingung:
Anregung bei 4,26 µm (IR)

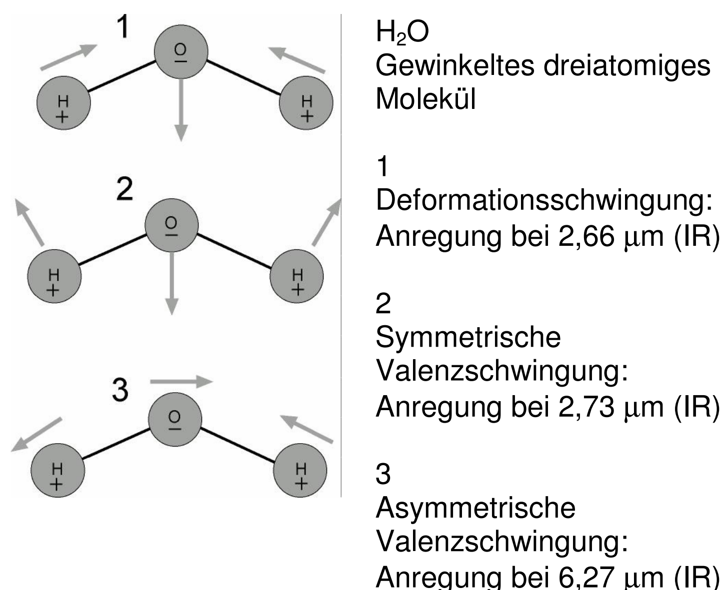
3
Deformationsschwingung:
Anregung bei 15,0 µm (IR)



(Grafik: Wikipedia)

Grafik links und Daten nach H. Günzler, H.M. Heise, IR-Spektroskopie, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim 1996

Wasser (H_2O) ist ein im Gegensatz zum CO_2 gewinkeltes dreiatomiges Molekül:

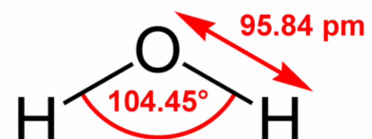


H_2O
Gewinkeltes dreiatomiges Molekül

1
Deformationsschwingung:
Anregung bei 2,66 µm (IR)

2
Symmetrische Valenzschwingung:
Anregung bei 2,73 µm (IR)

3
Asymmetrische Valenzschwingung:
Anregung bei 6,27 µm (IR)



(Grafik: Wikipedia)

Grafik links und Daten nach H. Günzler, H.M. Heise, IR-Spektroskopie, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim 1996

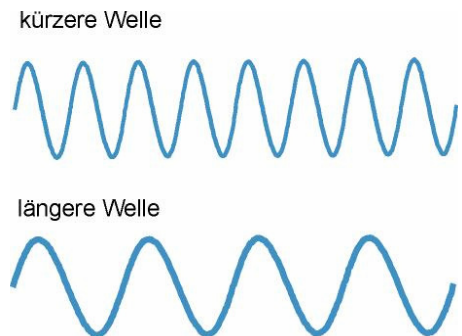
Versuche

Wärmestrahlung ist „unsichtbares Licht“



Halte die Fernbedienung eines Fernsehers oder Videorecorders vor die Linse einer Digitalkamera. Drücke auf eine der Fernbedienungstasten.
In der Mehrzahl der Fälle ist im Display der Kamera oder auf dem Bild eine bläulich flimmernde Leuchtdiode zu sehen. Viele Digitalkameras (nicht alle) „sehen“ infrarotes Licht. Das die Fernsteuerbefehle übermittelnde Licht hat eine Wellenlänge von 950 nm (Nanometer) und ist für unsere Augen nicht sichtbar.

Wärmestrahlung sind elektromagnetische Wellen die durch ihre Wellenlänge (bzw. ihre Frequenz) charakterisiert sind. Hier reicht die Wellenlänge: Sie wird in Bruchteilen eines Meters (mm = Tausendstel Meter, µm = Mikrometer = Millionstel Meter, nm = Nanometer = Milliardstel Meter) angegeben. Infrarotstrahlung wird in Bezug auf das „kurzwellige“ Licht gerne als „langwellig“ bezeichnet. Es ist im Vergleich etwa zu den Wellenlängen im Radio-, Fernseh- oder Kommunikationsbereich immer noch „kurzwellig“.



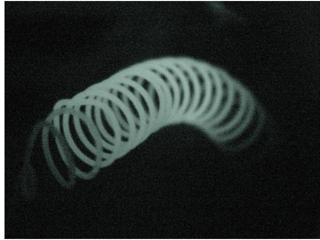
Mit dem oben genannten Versuch lässt sich untersuchen welche Materialien die Strahlung (von 950 nm) hindurch und welche nicht.
Dabei wird man (überrascht) feststellen, das Glas für die infraroten Signale der Fernbedienung durchaus durchsichtig ist. Die Aussage „Glas lässt Infrarotes Licht (oder Wärmestrahlung) nicht hindurch“ stimmt in dieser generellen Form nicht. Es kommt auf die Wellenlänge der Strahlung an.

Heiße Bilder





Die folgenden Versuche machen der Zusammenhang zwischen Wärme und Strahlung deutlich. Die Verwendung der Kamera unterstützt die Erkenntnis, dass Wärmestrahlung für unsere Augen unsichtbares Licht ist.
Stelle eine Herdplatte (Elektroherd) auf maximale Stufe und beobachte sie durch eine Digitalkamera. Zuvor muss die Empfindlichkeit (z.B. ISO 400) und der Infrarotanteil erhöht werden. Die dafür notwendigen Einstellungen werden von Kamera zu Kamera verschieden sein und man wird ein wenig herumprobieren müssen. Die Herdplatte wird rot bevor unsere Augen das Rot wahrnehmen. Besonders gut klappt das im Dunkeln. Die Aufnahme entstand mit einer SONY Cybershot P73 Digitalkamera.

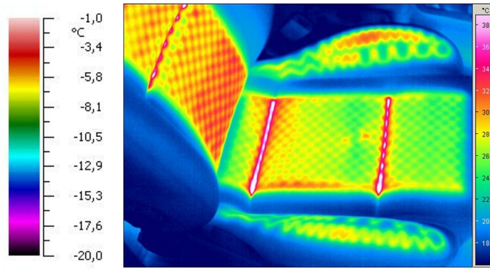


Gut geeignet ist auch eine aus Konstantandraht hergestellte Glühwendel die an einen regelbaren Trafo angeschlossen wird. Die Kamera „sieht“ das Glühen im Dunkeln früher und erheblich heller als unsere Augen. Die Aufnahme habe ich im Dunkeln mit einer auf „Nightshot“ eingestellten SONY F 626

In der Bauthermografie werden Wärmebildkameras eingesetzt, die durch Falschfarbenabbildung „Energielecks“ aufspüren können:
Im Schul-LAB (www.schul-lab.de) können Schulen damit experimentieren.



Quelle:Internet



Quelle:Internet



Eigene Aufnahme

Strahlung, Absorption, Reflexion, Konvektion, Wärmestrahlung und Glashauseffekt

Erforderliche Materialien:

- Strahler (100 Watt)
- 2 Metallplatten mit schwarzer bzw. weißer Oberfläche (z.B. Kupfer, 1 mm dick)
- 2 Digital-Thermometer
- 1 Infrarot-Thermometer
- 3 Liter Glasbecken

1 - Stelle einen Strahler etwa 10 cm über den schwarz bzw. weiß gefärbten Metallplatten auf! Befestige die Messfühler der Digital-Thermometer auf der Mitte der Platte (Tesafilm)! Schalte die Leuchte ein und protokolliere den Temperaturverlauf (Tabelle/Graph) in Abhängigkeit von der Zeit!

Ergebnis: Die Platte mit der schwarzen Oberfläche wird erheblich wärmer. Schwarze Gegenstände **absorbieren** („schlucken“) das Licht und wandeln es in **Wärme** um. Die weiße Oberfläche dagegen **reflektiert** das Licht.

2 - Halte die Hände in kurzem Abstand über die Metallplatten!

Beobachtung: Über der schwarzen Platte ist mehr Wärme zu fühlen.
Vermutung: Warme Luft steigt auf (**Konvektion**)

3 - Stelle die Platten senkrecht auf und bestrahle sie seitlich. Halte die Hände in kurzem Abstand davor!

Ergebnis: Auch hier ist die von der warmen Platte ausgehende Wärme zu spüren
Hier fühlen wir die (unsichtbare) **Wärmestrahlung**.
Dass wir die Wärme spüren können, ohne die Platte zu berühren, liegt bei waagerechter Lage an der

- Konvektion
- Wärmestrahlung

Bei senkrechter Aufstellung liegt es an der von der Platte ausgesandten

- Wärmestrahlung

4 - Lasse die Metallplatten auf Zimmertemperatur abkühlen!
Befestige währenddessen den Messkopf des Infrarot-Thermometers über der Metallplatte. Wiederhole den Versuch 1. Protokolliere die gemessenen Temperaturen.

Das Infrarot-Thermometer registriert – berührungslos - die vom Objekt ausgehende Wärmestrahlung und rechnet deren Wellenlänge bzw. Frequenz in die entsprechende Temperatur um. Die Temperatur eines Gegenstandes und die Wellenlänge der von ihm ausgesandten Wärmestrahlung stehen in einem **proportionalen Verhältnis**. Je höher die Temperatur, desto kürzer die Wellenlänge.

5 - Lege eine Glasplatte in ca. 1-2 cm Höhe über die Metallplatte (Glas auf kleine Stützen, z.B. Streichholzschachteln stellen). Befestige den Messfühler des zweiten Digital-Thermometers auf der Glasplatte. Verfolge die Temperaturentwicklung.

Ergebnis: Die mit dem Infrarot-Thermometer gemessene Temperatur entspricht der Temperatur der Glasplatte (in der Regel Raumtemperatur). Die Glasplatte wird im Laufe der Zeit nur geringfügig erwärmt. Die Metallplatte darunter wird deutlich wärmer.
Vermutung: Die Wärmestrahlung, die von der Metallplatte ausgeht, wird von der Glasplatte nicht durchgelassen und daher vom IR-Thermometer nicht registriert. Die geringfügige Erwärmung des Glases kommt dadurch zustande, dass Konvektion und Wärmestrahlung von unten wirkt und dass auch das Glas einen kleinen Anteil des Lichts absorbiert und diesen Teil in Wärme verwandelt.

6 - Fülle zwei schwarz gefärbte Dosen mit Wasser. Befestige die Messfühler der Digital-Thermometer auf der Dosenoberfläche (auf der gleichen Höhe). Tauche die Messfühler der Digitalthermometer ins Wasser. Stülpe ein quaderförmiges Glasgefäß über die eine Dose und beleuchte beide seitlich so, dass die Messfühler in die gleiche Richtung zeigen. Ermittle die Temperaturverläufe!

Ergebnis: Das Wasser in der Dose unter der Abdeckung wird wärmer als im Kontrollversuch.
Vermutung: Die Konvektion wird vom Glasgefäß eingeschränkt. Die Wärmestrahlung wird vom Glas zurückgehalten.

Wasserdampf und Wolken absorbieren Wärmestrahlung

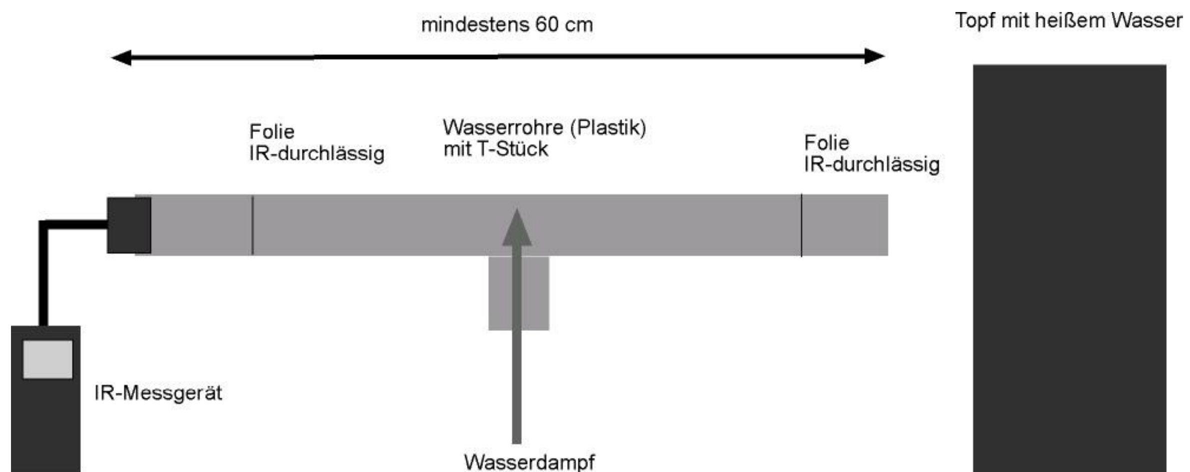
Bei einer Reihe von Experimenten brauchen Sie IR-transparente Folie. Das kann übliche Haushalts- oder Frischhaltefolie sein, deren Durchlässigkeit für langwellige Wärmestrahlung Sie aber selbst testen sollten. Halten Sie das IR-Thermometer vor einen warmen Gegenstand und schieben Sie die Folie dazwischen. Die Temperatur sollte nur geringfügig zurückgehen.
In einer sternklaren Nacht kühlt die Erdoberfläche erheblich stärker ab, als bei bedecktem Himmel. Gasförmiger Wasserdampf und aus kondensierten Wassertröpfchen bestehende Wolken halten einen Teil der vom Erdboden ausgehenden Wärmestrahlung zurück.

Dem folgenden Versuch, der sich vielfältig abwandeln ist, kommt langes Rohr zum Einsatz. Die von einer nahezu konstanten Wärmequelle (großer Topf mit warmem Wasser) ausgehende Strahlung soll einen möglichst langen Weg durch die künstliche, „Treibhausgase“ enthaltende Atmosphäre durchlaufen.

Erforderliches Material:

- 2 lange Plastikrohre (z.B. HT-Rohr aus Polypropylen, Baumarkt), zwei passende Muffen und ein dazu passendes T-Stück (alle mit Gummidichtungen)
- IR-transparente Haushaltsfolie
- IR-Temperaturmessgerät
- Digitalthermometer
- ein großer Topf mit warmem Wasser
- Wasserkocher (Wasserdampf)

1 - Stecke die Plastikrohre so ineinander, dass ein „T“ entsteht (siehe Abbildung)
Stecke den Messkopf des IR-Thermometers in das Rohr. Fülle den Topf mit warmem Wasser und stelle ihn am anderen Ende des „Ts“ auf. Kontrolliere die Temperatur des Wassers mit dem Digitalthermometer. Das große Wasservolumen sollte möglichst langsam abkühlen. Miss die Oberflächentemperatur des Topfes mit dem IR-Thermometer.
Der Abstände der Versuchselemente dürfen jetzt nicht mehr verändert werden.



Spanne zwei passende Stücke Haushaltsfolie in die Rohre ein). Miss die Temperatur des Topfes erneut.

Ergebnis: Die gemessene Temperatur liegt unter dem tatsächlichen Wert. Die Folie absorbiert einen (geringen) Teil der vom Glasbecken ausgehenden Strahlung.

Lasse den „Wasserdampf“ aus einem Wasserkocher in das T-Stück steigen. Achte auf die Temperatur.

Ergebnis: Die Temperatur sinkt nach kurzem Ansteigen schnell um ein bis mehrere Grad gegenüber der Ausgangstemperatur ab. Wenn kein „Wasserdampf“ mehr in das „T“ steigt, steigt die Temperatur wieder an. Wenn die Folien beschlagen, fällt der Anstieg geringer aus. Vermutung: „Wasserdampf“ und Wassertropfen (auf der Folie) absorbieren einen Teil der Wärmestrahlung. Das IR-Thermometer kann die Oberfläche des Topfes nicht mehr „sehen“.

Der Begriff „Wasserdampf“ ist hier in Anführungszeichen gesetzt worden, weil das, was aus dem Wasserkocher aufsteigt, sowohl Wasserdampf im physikalischen Sinne, also unsichtbares, gasförmiges Wasser ist als auch aus kondensierten, schwebenden Wassertröpfchen bestehende „Wolken“.

Die vorgeschlagene Methode zum erwarteten Ergebnis, ist aber nicht unproblematisch: Der „Wasserdampf“ schlägt sich zu leicht auf den Folien nieder und erschweren die Sicht durch das Rohr. Es lässt sich kaum feststellen, ob sich Wolken bilden oder nicht.

Um wirkliche Wolken herzustellen, bedarf es einer feuchtigkeitsgesättigten Atmosphäre und Teilchen, an denen sich das Wasser niederschlagen kann:

Wolken machen: Kondensationskeime

Warum bildet sich der Niederschlag nur an der Flaschenwand und nicht in der Flasche?
Um kondensieren zu können, benötigt der unsichtbare Wasserdampf Oberflächen an denen er sich niederschlagen kann. In der Luft sind dies sogenannte Kondensationskeime. Das können Staubpartikel, Ascheteilchen aus Vulkanen, Ruß aus Schornsteinen oder, in Meeresnähe Salzteilchen sein. Reine, staubfreie Luft kann 100% rel. Luftfeuchtigkeit erreichen ohne dass es zur Kondensation kommt.
Es reicht, ein Streichholz anzuzünden, es in eine wasserdampfgesättigte Umgebung zu tauchen und dann auszupusten.
Geben Sie etwas lauwarmes Wasser in eine große PET-Flasche. Schwenken Sie die Flasche vorsichtig hin und her bis die Innenwand von einem Wasserfilm überzogen ist. Bringen Sie jetzt etwas Rauch in die Flasche. In einer trockenen Flasche (Kontrollversuch) wird er nach kurzer Zeit zu Boden sinken, in einer wasserdampfgesättigten Flasche führt dies sofort zur anhaltenden Wolken- oder Nebelbildung. Besser für Finger und die Flasche ist es, einen Glimmspan an einem Schaschlikstab zu befestigen, die Flamme auszupusten und den rauchenden Span kurz in den Flaschenhals zu tauchen. Gut geeignet sind die in Gärtnereien benutzen Splitstäbe. Eine Zigarette tut es natürlich auch…

Darauf dass die Wolkenbildung auch druckabhängig ist und wie man schönes Hoch- bzw. schlechtes Tiefdruckwetter in Flaschen oder Einmachgläsern erzeugt lesen Sie bitte in der Arbeitshilfe 19.6 „Wetterküche“.

Als Abwandlung des oben beschriebenen Versuchs versuchen Sie bitte folgendes:

„Vernebeln“ Sie mehrere PET-Flaschen und drücken Sie den Inhalt vorsichtig in das T-Stück. Der „Nebel“ ist langlebiger wird – anders als der „Wasserdampf“ aus dem Wasserkocher – schnell die Umgebungstemperatur annehmen.
Ideal wäre es, den „Nebel“ im Rohr selbst zu erzeugen: Dazu kann man statt des T-Stücks einen Doppelabzweig einsetzen und den nach unten weisenden Abzweig mit einer Abschlusskappe verschließen. Nachdem der untere Abzweig mit lauwarmem Wasser gefüllt ist, können die Kondensationskeime vom oberen Abzweig her eingebracht werden. Wenn das ganze System vorher einmal ins Wasser getaucht wurden sind die Ergebnisse besser.

Für präzisere Messungen benutzen Sie statt des IR-Thermometers eine MOLLsche Thermosäule (siehe unten).

Experimente mit der „Klimaflasche“
Wolken, Wasserdampf und CO_2 halten Wärmestrahlung zurück



Versuchsmaterialien:

- Eine große PET-Flasche mit Schraubverschluss
- Glasplatte
- Verschiedene Typen Frischhaltefolie (durchlässig für Wärmestrahlung)
- Tesafilm oder UHU
- Wärmequelle: Großer, schwarzer Topf mit warmem Wasser
- IR-Thermometer zur Messung der Oberflächentemperatur des Strahlers
- Digitalthermometer zur Messung der Wassertemperatur

Für die Untersuchung der Wirkung von Wolken:
- Wasser
- Streichholz, Schaschlikstab („Glimmspan“) oder Splitstab aus Gärnertei

Für die Untersuchung der Wirkung von CO_2 (vergl. Abbildung oben):

- CO2, aus der Flasche oder als Reaktionsprodukt aus z.B. Essig und zerstoßenen Kalksteinen oder Muschelschill.
-

1 – Miss die Temperatur der Wärmequelle aus etwa 30 cm Entfernung mit dem IR-Thermometer. Achte darauf, dass der Messkegel des Sensors nur die Wärmequelle und nicht die Umgebung erfasst.
Halte eine Glasplatte zwischen Wärmequelle und Thermometer.
Ersetze die Glasplatte durch Haushalsfolie

Ergebnis: Die Glasplatte lässt die von der Wärmequelle ausgehende Wärmestrahlung nicht hindurch. Was wir messen ist die Temperatur der Glasplatte (wahrscheinlich Raumtemperatur) Die dünne Folie dagegen lässt den überwiegenden Teil der Wärmestrahlung passieren

2 – Finde die für IR-Strahlung transparenteste Frischhaltefolie!

3 – Schneide in die PET-Flasche zwei sich gegenüberliegende Fenster und klebe mit Tesafilm jeweils eine Lage Frischhaltefolie darüber.

4 – Stelle die so vorbereitete Flasche zwischen die Wärmequelle und das Thermometer. Achte darauf, dass die die Fenster und das IR-Thermometer in einer Sichtlinie liegen. Drehe die Flasche so, dass die Wärmestrahlung durch die Fenster fällt und dann so, dass die Fenster quer dazu liegen.

Ergebnis: Wenn die Fenster in Strahlungsrichtung ausgerichtet sind, „sieht" das Thermometer die Strahlung der Wärmequelle. Liegen die Fenster im 90°-Winkel dazu hält das PET-Material die Strahlung wie eine Glasscheibe zurück, das Thermometer „sieht" nur die Temperatur der Flasche.

Wärmestrahlung und (unsichtbarer) Wasserdampf

1 – Gib wenig (!) lauwarmes Wasser in die Flasche. Achte auf das IR-Thermometer.

Ergebnis: Die Temperatur geht geringfügig zurück. Wasserdampf hält Wärmestrahlung zurück. Sobald die Innenseite der Flasche beschlägt, lässt sich nicht mehr entscheiden, ob die Strahlungsabnahme durch den (unsichtbaren) Wasserdampf oder den (sichtbaren) Niederschlag verursacht wird.

Wärmestrahlung und Wolken

1 – Gib etwas lauwarmes Wasser in die Flasche. Die Wände der Flasche und die Folienfenster sollten dabei möglichst trocken bleiben! Zünde den Schaschlickstab an, blase die Flamme aus und stecke ihn in die Flaschenmündung. Achte, während sich die Flasche mit Nebel füllt, auf das IR-Thermometer.

Ergebnis: Die Temperatur geht etwas zurück. Wolken halten die Wärmestrahlung zurück.

(Mehr zum „Wolkenmachen" in der Arbeitshilfe 19.6 „Wetterküche")

Wärmestrahlung und CO_2

1 – Fülle die Flasche mit CO_2.
Wenn das CO_2 aus direkt aus der Druckflasche entnommen wird, kühlt es sich beim Austritt ab. Das würde das Versuchsergebnis verfälschen. Es ist daher ratsam, das CO_2 zunächst vorsichtig in ein Gefäß, z.B. einen großen Messbecher zu geben und dort zu lassen, bis das Gas Raumtemperatur angenommen hat (Kontrolle!). Da CO_2 schwerer ist als Luft bleibt es in ruhiger Umgebung auch ohne Deckel im Gefäß liegen.
Alternativ dazu kann CO_2 auch mit Kalk und Säure erzeugt werden. Zerstoße dazu Muschelschalen oder Kalkgestein (keine Schulkreide, das ist Gips!) und gib Ascorbinsäure (Vitamin C) aus der Apotheke dazu. Wenn die Mischung mit Wasser übergossen wird beginnt sie zu brausen und es entsteht CO_2. Natürlich kann man auch Essig oder Essigessenz und Kalk nehmen. Der CO_2-Pegel sollte die Oberkante der Fenster erreichen, was aber natürlich nicht sichtbar ist.

Ergebnis: Die Temperatur geht etwas zurück. CO_2 hält die Wärmestrahlung zurück.

Bei der Reaktion ist Wasser beteiligt das dem System einen Teil der Wärme entzieht. Der unter Umständen an der Innenwand entstehende Niederschlag verfälscht das Ergebnis. Besser ist es, das CO2 außerhalb der „Klimaflasche“ zu erzeugen, etwa in einer mit einem durchbohrten Stopfen und einem Schlauch versehenen zweiten PET-Flasche. Zerstoßenes Kalkgestein oder Calciumcarbonat wird mit Essig (besser noch Essigessenz) aufgegossen. Unter Schaumbildung bildet sich so viel CO_2 dass der Stopfen abgesprengt wird, wenn man den Schlauch zudrückt. Das langsam in die „Klimaflasche“ wandernde Gas ist – anders als im ersten Fall – trocken und sollte bereits Umgebungstemperatur angenommen haben. Besonders eindrucksvoll ist es, das CO_2 in einer Kanne „zwischenzulagern“ und das unsichtbare Gas in die Klimaflasche zu gießen. Übrigens, man kann, was sehr eindrucksvoll ist, damit auch eine in ein Marmeladenglas gestelltes Teelicht zum Erlöschen bringen.
Die Muschelschalen und das Kalkgestein zeigen, dass große Mengen CO_2 darin gebunden sind. Die gewaltigen in der Kreidezeit (vergleiche unsere Arbeitshilfe „GeoGarten“) abgelagerten und im hannoverschen Raum in großen Mergelgruben für die Zementindustrie aufgeschlossenen Kalkschichten zeugen warmen Meeren in denen viel $CaCO_3$ ausfiel und organisch – hier durch einzellige Coccolithophoriden, Seeigel, Belemniten und Ammoniten und andere „Fossilien“ gebunden wurden.
Der Versuch zeigt, dass diese Bindung durch Säure aufgelöst werden kann, ein Hinweis darauf, den pH-Wert des Meeres im Auge zu behalten. Warmes Wasser beschleunigt den Vorgang.
Die Erfahrung, dass eine in die Sonne gestellte Sprudelflasche beim Öffnen explosionsartig ausgast zeigt, dass die Meere CO_2 speichern können („CO_2-Senken“) und dass dieses Speichervermögen temperaturabhängig ist. Misst man den pH-Wert kalten und warmen Sprudelwassers wird deutlich, wie der Säuregrad und die Temperatur miteinander verkoppelt sind. Welche Konsequenzen ergeben sich aus steigenden Meerwassertemperaturen?

Demonstrationsversuch „Erde, Atmosphäre und Treibhauseffekt“
(Versuchs-Set im Schulbiologiezentrum ausleihbar!)

Das Versuchs-Set besteht aus:

- einem sich drehenden Globus mit schwarzem, am Äquator montierten Metallring
- einem Strahler („Sonne“)
- einer „Kunstatmosphäre“ aus Acryl
- einem Messkopf für Wärmestrahlung mit Zeigerinstrument („Klima-Forschungs-satellit im All“)
- einem großen Plastikbecher zum Einfüllen des CO_2

Zusätzlich erforderlich: CO_2-Flasche oder andere CO_2-Quelllen (z.B. Kalk und Essig)



Versuchsablauf: Wenn der Stromanschluss hergestellt ist leuchtet der Strahler und der Globus dreht sich. Warte, bis sich der schwarze Metallring auf etwa 60°C erwärmt hat (ggf. Kontrolle mit Infrarot-Thermometer). Bringe den Zeiger des Messgerätes mit Hilfe des rückseitig montierten Einstellknopfes auf etwa maximale Stellung.

Fülle CO_2 aus Gasflasche in den großen Plastikbecher. CO_2 ist schwerer als Luft, daher bleibt es im Becher. Gib den Becherinhalt von oben in die Kunstatmosphäre (Loch unten mit Korken verschließen!) und achte dabei auf den Zeigerausschlag.

Ergebnis: Der Zeiger sinkt scharf nach unten. Nach Entfernen des Korkens steigt der Zeiger wieder an.
Vermutung: Die vom Messkopf registrierte Wärmestrahlung wird nach Einfüllen des CO_2 geringer. CO_2 stellt für Wärmestrahlung ein Hindernis dar (ähnlich Glas, s. Experimente oben). Möglich wäre aber auch, dass die quer in den Strahlengang gespannte Folie durch das kalte Gas abgekühlt wird und dieser Effekt gemessen wird. Wenn dass CO_2 vorher in einen Luftballon geblasen wird und sich auf Zimmertemperatur erwärmen kann, lässt sich das leicht überprüfen.

Blase von oben in die „Kunstatmosphäre“ hinein. Auch hier ist ein Abfall des Zeigerausschlages zu beobachten (Hier wirkt auch der an den Folien kondensierende Wasserdampf!).
Hinweis: Das starke Absinken des Zeigerwertes sollte nicht überinterpretiert werden. Der zur Einstellung des maximalen Ausschlags verwendete Regler (Potentiometer) hat eine sehr lange Übersetzung und der Sensor ist sehr empfindlich, vergleichbar mit einem Messverstärker.

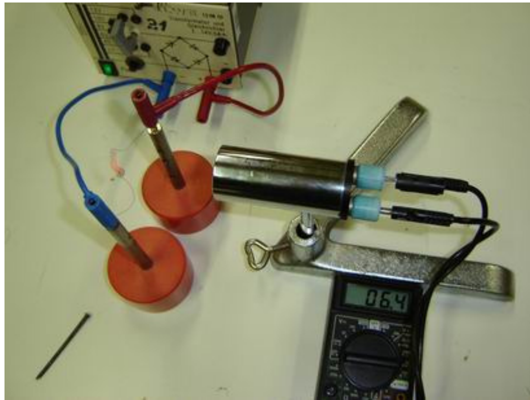
Präziseres Erfassen der Absorption mit einer Thermosäule

Die folgenden Versuche sind Abwandlungen des bereits oben skizzierten, der Nachweis ist aber durch die Verwendung einer Mollschen Thermosäule und einem empfindlichen Messverstärker eindeutiger. Die Thermosäule besteht aus mehreren hintereinander geschalteten Thermoelementen die bei Bestrahlung eine geringe Spannung abgeben.
Nachteil: Nur wenige Schulen dürften diese Geräte in der Sammlung haben!
Statt eines T-Rohrs werden ein oder mehrere beidseitig mit IR-Fenstern (Folie!) versehene Schuhkartons hintereinander gestellt. Als Wärmequelle dient eine von Schülern selbst hergestellte Glühwendel. Alternativ dazu eigenen sich große schwarze, mit Wasser gefüllte Töpfe, ein Bügeleisen mit konstanter Temperatur oder ein Leslie-Würfel. Zur Spannungsmessung empfiehlt sich ein Messverstärker. Ein empfindliches Spannungsmessgerät, z.B. ein digitales Multimeter reicht aber aus.



Die Versuche gelingen mit Wasserdampf, selbst erzeugtem Nebel, CO_2 aus der Druckflasche oder aus chemischen Reaktionen, mit dem „Abgas“ einer Kerze oder der Luft aus Auspuffrohren. Inwieweit die „HT-Klimakammer“ durch Aufkleben von Isoliertapete von der Umgebungstemperatur unabhängig gemacht werden muss wäre noch zu entscheiden.

Glas ist lässt Wärmestrahlung nur schlecht hindurch:

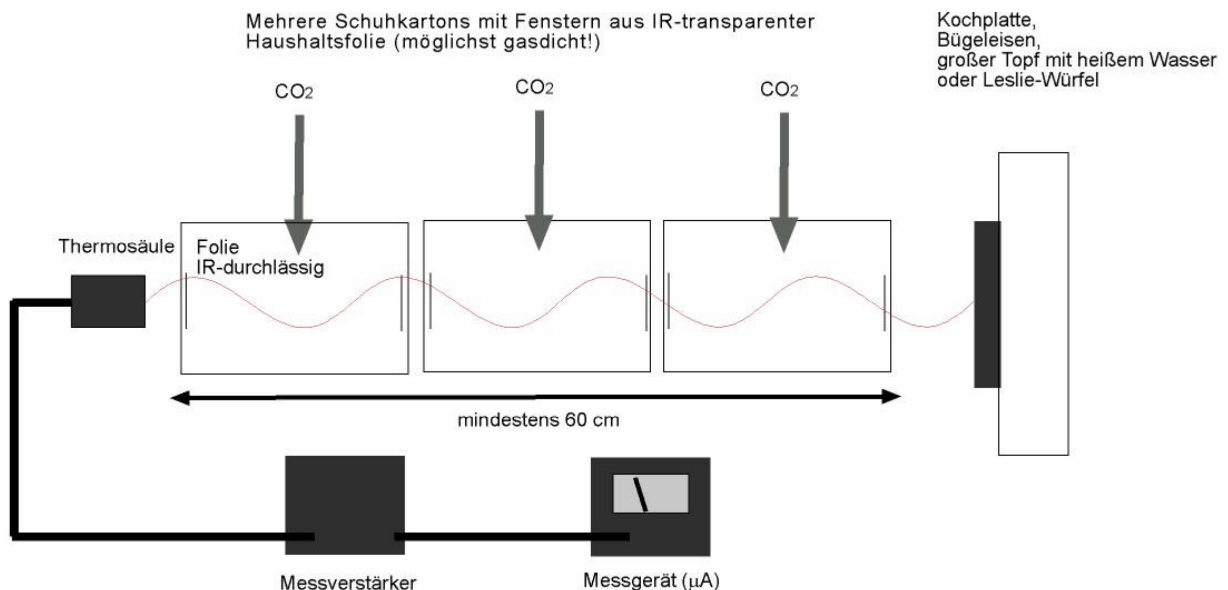

Ohne Glasscheibe

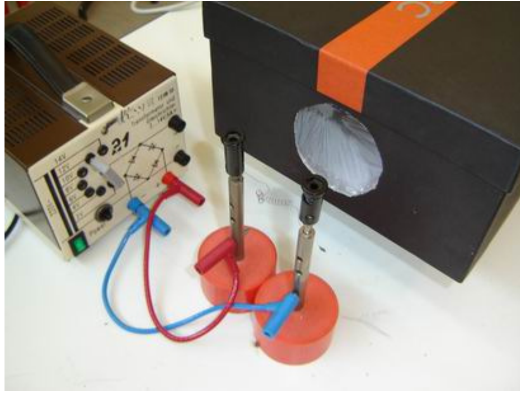

Mit Glasscheibe

Schließe die Thermosäule an ein digitales Multimeter an (Messbereich 200mV (o .ä.). Verbinde die auf einen Dorn (Nagel) gewickelte Glühwendel mit dem Netzgerät. Warte bis die Temperatur konstant ist. Schiebe dann eine Glasscheibe dazwischen. Die von der Thermosäule abgegebene Spannung sinkt fast auf Null.

CO_2 und Absorption von Wärmestrahlung:

Versuchsaufbau (schematisch):



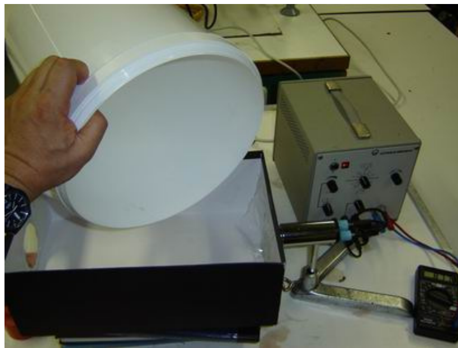




Klimakammer Vorderseite:
Schuhkarton mit Folienfenster,
Glühwendel, Netzgerät

Klimakammer Rückseite:
Schuhkarton mit Folienfenster, Thermosäule,
Messverstärker, Messgerät

Baue Sie den Versuch wie in der Abbildung dargestellt auf. Überklebe die Fenster in den Schuhkartons mit transparenter Haushaltsfolie.
Bringe die Wärmequelle auf eine konstante Temperatur: Die Messgerät-Anzeige kann durch Einregeln am Messverstärker auf Null oder Vollausschlag gebracht werden.



Gib das in einem Eimer zwischengelagerte „Treibhausgas“ langsam in den Karton. Der Zeigerausschlag sollte um einen bestimmten Wert zurückgehen und nach Entfernung des „Treibhausgases“ wieder anzusteigen (vergleiche Demonstrationsversuch „Erde, Atmosphäre und Treibhauseffekt“).
Als Zusatzeffekt kann man Seifenblasen auf die CO_2-Schicht geben. Sie „schwimmen“, da leichter als CO_2, auf der unsichtbaren CO_2-Schicht.

„Lebensnahes“ Experiment zum CO_2-Treibhauseffekt



Dieses Experiment haben wir in den 90er Jahren häufig durchgeführt. Es vergleicht zwei Atmosphären, eine „normale“ und eine, mit CO_2 aus der Verbrennung fossiler Energieträger angereicherte. Der Versuch gelingt nicht immer und hat die Frage aufgeworfen, warum ein hoher CO_2-Pegel so wenig und manchmal keine Wirkung zeigt.

Benötigt werden:

- 2 Glasglocken
- Glasplatten
- 2 schwarzlackierte Metallplatten
- 2 dazu passende Dämmplatten als Unterlage
- 12 Teelichte
- Vaseline oder Exsikkatorfett
- 2 digitale Temperaturmessgeräte (auf Gleichlauf achten!)
- 1 150W Strahler (oder stärker!), sonst (besser) die Sonne

Dieser Versuch ist insofern „lebensnah“, weil ein direkter Zusammenhang zwischen der Verbrennung fossiler Energie (Stearin = Erdölprodukt), CO_2 und der Temperatur in einer (geschlossenen) Atmosphäre herstellbar ist. Das Experiment ist als Doppelversuch ausgelegt. Im Ansatz A erzeugen wir durch mit Hilfe von 6 Teelichten CO_2, im Ansatz B nicht. Die Glasglocken müssen gut schließen, die geschliffenen und mit Vaseline eingefetteten Ränder sind auf Glasplatten zu stellen.
Damit das Luftvolumen in beiden Ansätzen übereinstimmt und weil die Kerzenkörper eine gewisse Wärmemenge aufnehmen, sollte im Ansatz B die gleiche Anzahl Teelichte aufgestellt werden. Sorge dafür, dass sich der Strahler genau in der Mitte über den beiden Versuchsanordnungen befindet. Beide Messgeräte müssen bei Versuchsbeginn die gleiche Temperatur anzeigen. Die kurzwellige Strahlung der Lampe wird von schwarz-lackierten Metallplatten "geschluckt" (absorbiert) und in langwellige Wärmestrahlung verwandelt.
Schließe die Leitungen an die Messgeräte und befestige die Fühler (das blanke Ende der Leitungen) mit Tesafilm mittig auf den Metallplatten (schwarze Seite nach oben). Lege diese auf die Dämmstoff-Platten. Stelle jeweils sechs Teelichte um die Metallplatten herum auf. Zünde die Teelichte im Ansatz A (nicht in Ansatz B) an, und stülpe dann die Gasglocken über beide Versuchsanordnungen. Nach etwa einer Minute verlöschen die Kerzen.
Die Temperatur der Ansätze kann jetzt mit Hilfe der schnell reagierenden Messgeräte fortlaufend überwacht werden. Protokollieren Sie die Temperaturen im Minutenabstand und erstellen Sie eine Verlaufskurve.

Versuchsergebnis:
Die Temperatur im Ansatz B läuft der im Ansatz A gemessenen zunächst deutlich davon (Verbrennungswärme). Die Kerzenflamme führt zu Niederschlag an der inneren Glaswand (Wasserdampf, geringere Einstrahlung). Nach dem Erlöschen der Flammen kann sich auch Stearindampfkondensat auf der Glasoberfläche niederschlagen.
Nach dem Abkühlen liegt die Temperatur im CO_2-haltigen Gefäß oft etwas höher, manchmal aber auch nicht.
Gründe für den mitunter unbefriedigenden Versuchsausgang können in einem zu schnellen Temperaturausgleich zwischen Innen- und Außenmilieu liegen. Danach sollte der Versuch bei wärmeren Außentemperaturen besser gelingen. Die geringe Größe der Glasglocke könnte ebenfalls nachteilig auswirken, thermisch bedingte Auf- und Abwärtsbewegungen der eingeschlossenen Luft mögen das Ergebnis verfälschen. Es wäre sinnvoll, größere Gefäße zu verwenden an mehreren Stellen Temperaturfühler anzubringen.

Auch das langsame Einfüllen von raumwarmen 100%igem CO_2 liefert keine wirklich überzeugenden. Für Verbesserungsvorschläge wären wir sehr dankbar!

Treibhauseffekt in der Isolierkanne



Im Schul-LAB der IGS Mühlenberg* überzeugte folgende Methode:
In ein großes und hohes Dewar-Gefäß (eine bessere Thermoskanne!) wird etwas dunkle und trockene Blumenerde gegeben. Dort wird auch der Messfühler eines Digitalthermometers angebracht. Schließlich wird eine transparente Folie über das Gefäß gezogen. Sie lässt das Licht und die Wärmestrahlung passieren, unterbindet aber die Konvektion. Als Wärmequelle („Ersatzsonne“) dient ein darüber aufgestellter Scheinwerfer.

Sobald sich die Temperatur auf einen konstanten Wert eingepegelt hat wird die Folie etwas zur Seite geschoben, CO_2 in das Gefäß gefüllt und die Folie wieder zurechtgerückt. Wichtig ist, dass keines der Versuchselemente verschoben wird. Jetzt gilt es zu warten und zu sehen, ob sich die Endtemperatur den „alten“ oder einen neuen, höheren Wert erreicht.
Bei dieser Methode wird ein Temperaturanstieg um 1 bis 2 Grad beobachtet.
Der Vorteil des Dewar-Gefäßes ist, dass sich eine, von den Zufälligkeiten der Umgebung eigene Temperatur aufbauen kann, dass nur wenig Wärme abfließen kann und dass das CO2 auf einer längeren Wegstrecke, vergleichbar mit der Erdatmosphäre wirken kann.
Ersatzweise kann man es mit einer gut isolierenden Thermoskanne versuchen. Alternativ dazu kann man sich ein einfaches Dewar-Gefäß selbst bauen und ein Rohr mit alubeschichteter Styroportapete ausschlagen.

Und warum nicht viel einfacher?

Im Internet sind viele ganz einfach Versuchsanleitungen zu finden: Nicht alle funktionieren!
Unter „http://www.is.wayne.edu/mnissani/a&s/co2class.htm“ findet sich (in Englisch) ein sehr einfaches aber höchst methodenkritisches Experiment. Der Ansatz, Misserfolge zu durchleuchten und daraus neue Verfahren zu entwickeln verdient Beachtung:

Procedure A: The Key Experiment

(a) Divide into groups.
(b) Glue identical pieces of black paper to the internal surface of both jars.
(c) Label one jar "control" and the other "experimental."
(d) Place the two jars side by side, just short of coming in direct contact.
(e) Place the reflector lamp some 3" above the jars, equidistant from the centers of both.
(f) Place a thermometer in each jar.
(g) Turn on the lamp and wait until temperatures in both jars stop rising.
Notes: (i) Make sure that temperatures of the two jars are roughly equal. If they differ by more than 1 ° C, try adjusting the position of the jars or adding black paper to one of them. (ii) While waiting for the jars' internal temperatures to stabilize, study the remainder of this manual.
(h) Pour about 12 ml of water (1/2" from the bottom of the vial) into each of the two vials.
(i) Gently slide one tablet into each vial. Plug each vial with the black rubber stopper, making sure that one end of the tubing snugly fits the stopper while the other end almost touches the bottom of the experimental jar.
Notes: (i) Because CO_2 is about 1.5 times heavier than air, some of it will remain at the bottom of the jar for a while.
(ii) Don't let the vial's bubbling mixture enter the tubing. If the liquid rises too high in the vial, remove the stopper for a second, let the bubbling subside, then replace the stopper. If this persists, put less water in the vial next time.
(j) In a minute or two, when most of the effervescence subsides, remove the tubing from the jars.
(k) Record the internal temperature of both jars.
(l) Remove the stoppers from both vials and rinse the vials.
(m) Repeat steps (h)-(l) above four more times (for a total of ten tablets).
(n) Turn off the light.



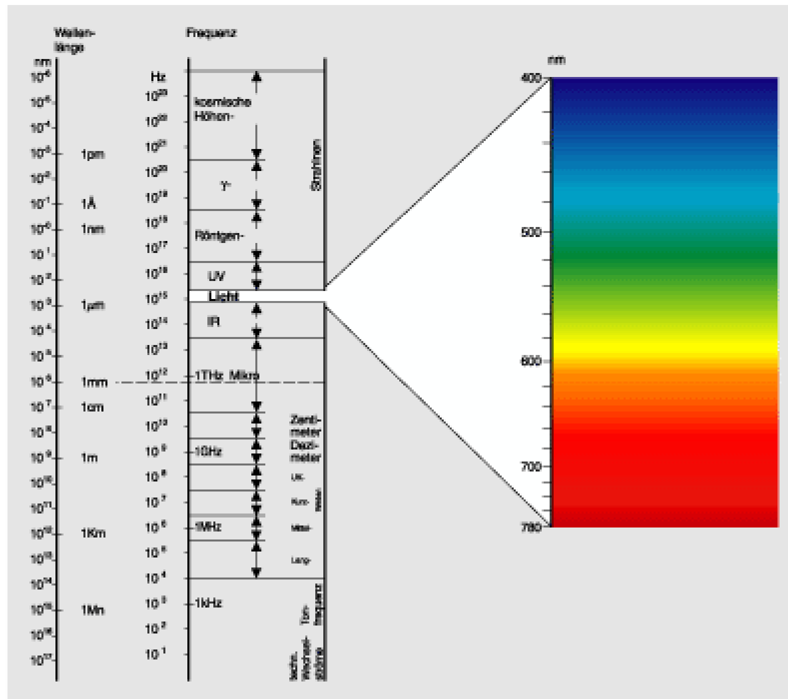
Figure 1: A single reflector lamp is placed 3" above two identical jars whose internal surfaces have been covered with black paper. A thermometer is placed in each jar and the light is switched on. When temperatures inside both jars stop rising, a CO_2-emitting reaction is started in one or more nearby vials. As the CO_2 flows from the vial(s) to the bottom of the experimental jar, this jar becomes warmer than the control jar.

*) Wir danken den Kollegen im Schul-LAB Hannover für ihre Hinweise und die kritische Durchsicht der älteren Auflagen. Weiterhin Bernd Hofmann von der Leibnizschule für seine Hinweise und Versuchsmaterialien.

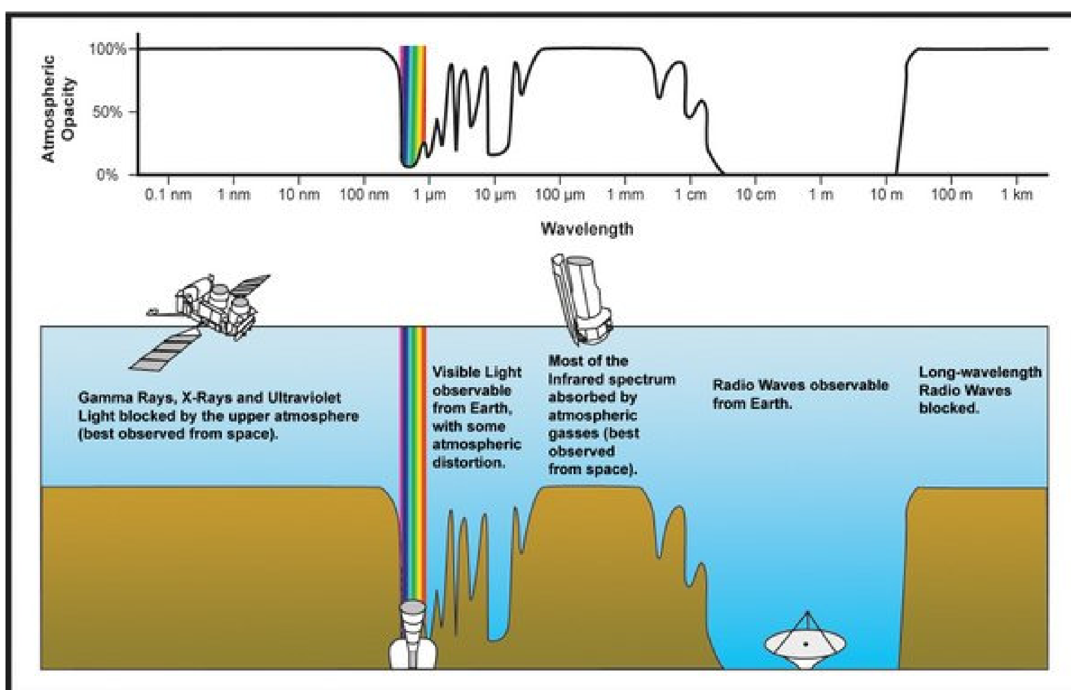
Ingo Mennerich, Juni 2001
Überarbeitete Neuauflage Juni 2007

Anhang:

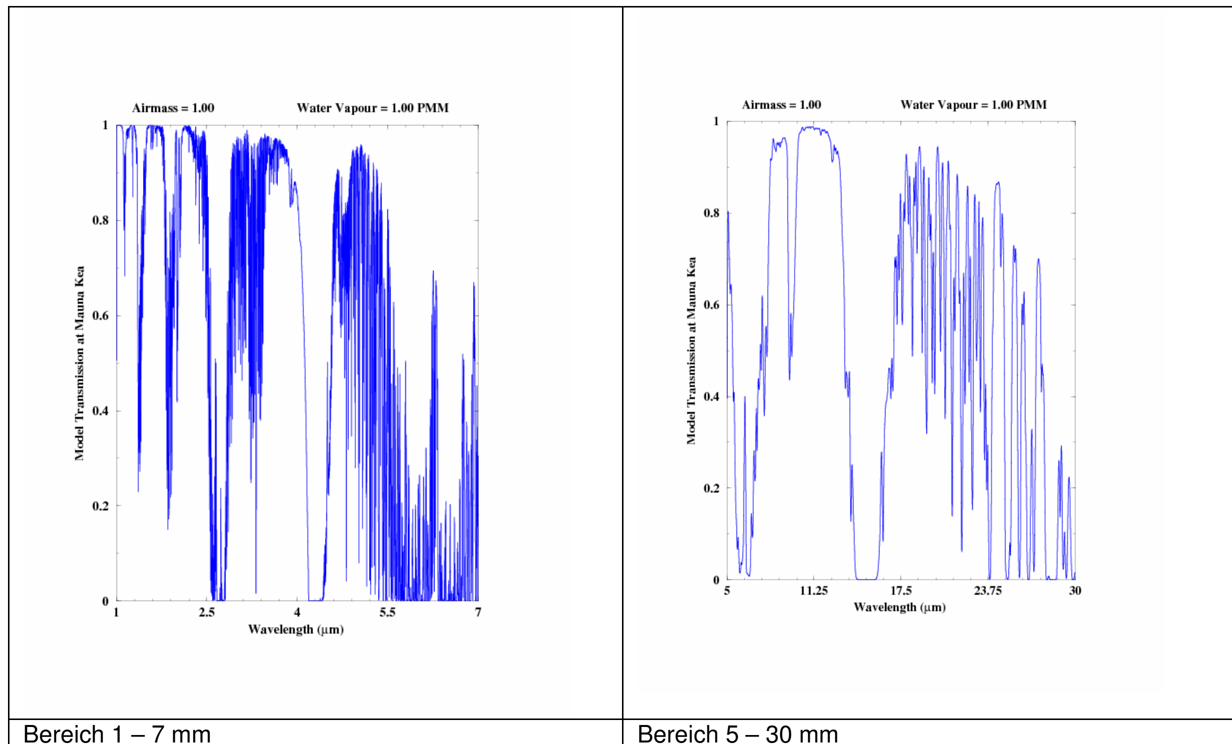
Elektromagnetische Strahlung
herausgeboben: Sichtbares Fenster (Licht)



Spektrale Durchlässigkeit der Erdatmosphäre
Quelle: **www.answers.com/topic/telescope**

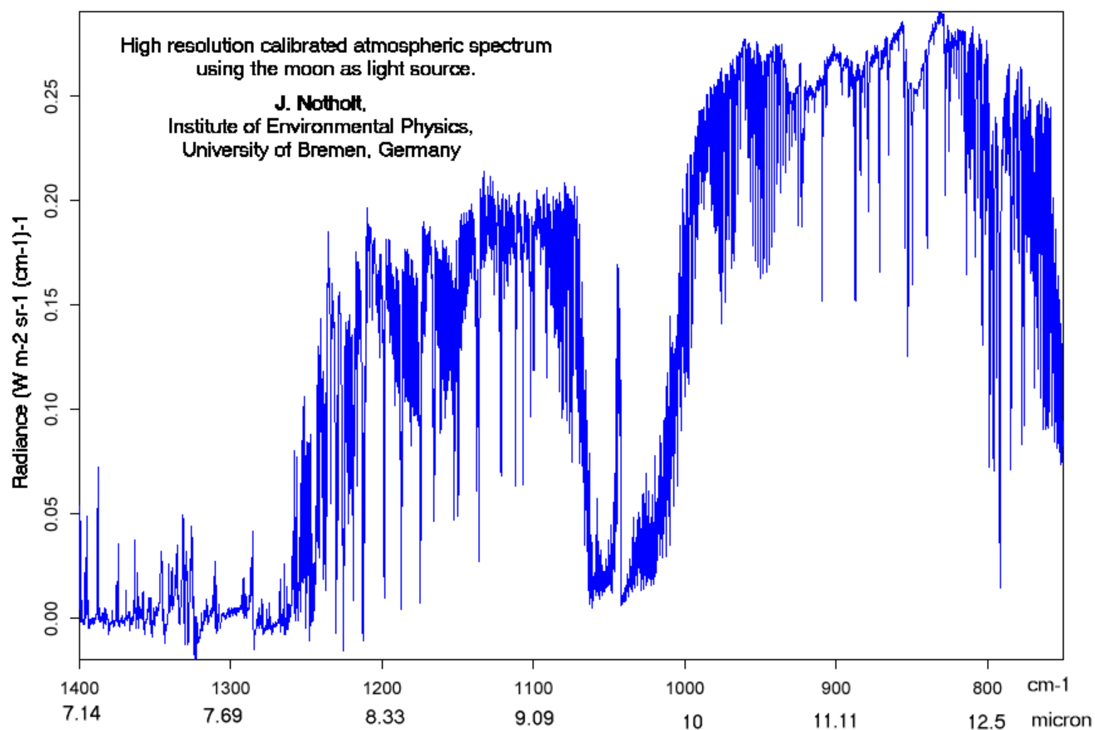


Theoretische Spektrale Durchlässigkeit der Erdatmosphäre im nahen Infrarotbereich
Quelle: http://staff.gemini.edu/~kvolk/nirtrans.html



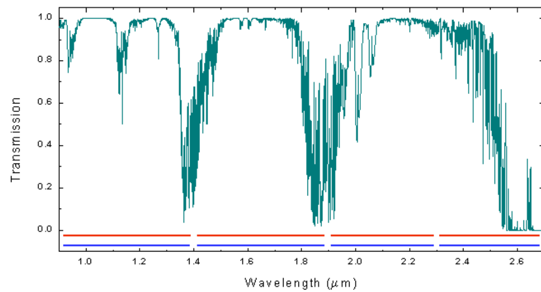
Bereich 1 – 7 mm	Bereich 5 – 30 mm

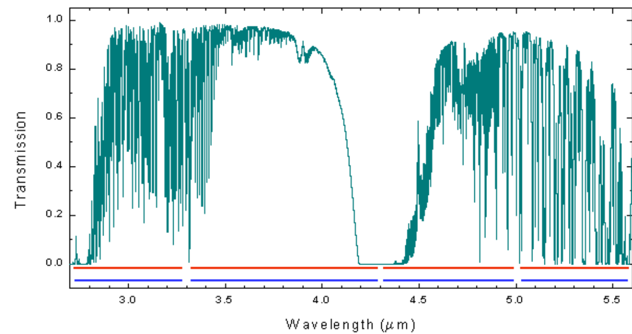
Spektrale Transparenz der Erdatmosphäre im nahen Infrarot. Strahlungsquelle: Der Mond
Institut für Umweltphysik Universität Bremen
Quelle: http://members.lycos.nl/ErrenWijlens/co2/arrhenius.html



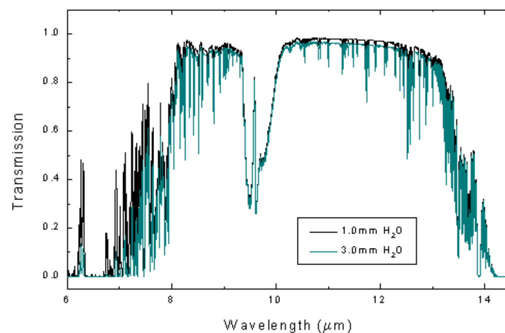
Transmissionsspektren der Erdatmosphäre aufgenommen vom Gemini Observatory in Hawaii, www.gemini.edu: Auf der Internetseite lassen sich Atmosphären mit unterschiedlichem Wasserdampfgehalt simulieren.

Overview spectra are presented below for the wavelength ranges 0.9 - 2.7 and 2.7 - 5.6µm with a water vapour column of 1.6mm and an air mass of 1.0.

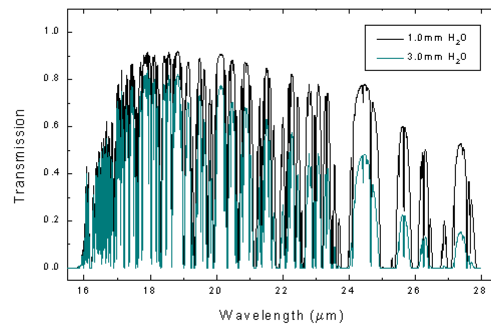




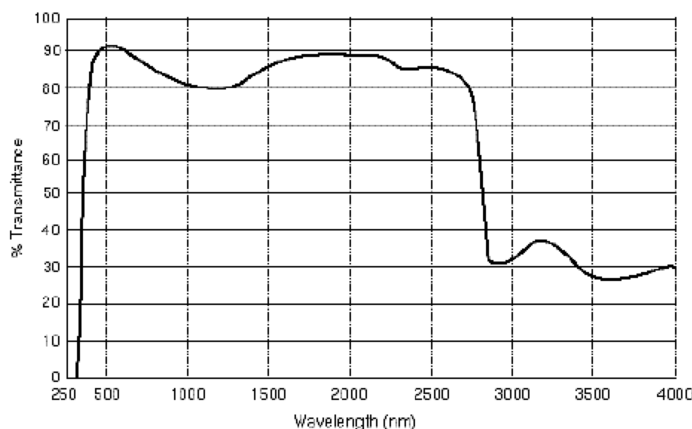
The atmospheric absorption in the 10µm-window is characterised mainly by CO_2 and ozone. The principal effect of an increase in the water vapour column above the site is an overall reduction of transmission, and consequent increase in the sky background, as shown by the curves for 1.0 and 3.0mm of H_2O in the following figure:



The far greater atmospheric absorption in the 20µm window is dominated by water vapour, as shown by the curves for 1.0 and 3.0mm of H_2O in the following figure:



Transmission von 3mm starkem Fensterglass (float glass) im nahen IR-Bereich
Quelle: www.uqgoptics.com/materials_commercial_cornin...



SODALIME FLOATGLASS 3mm

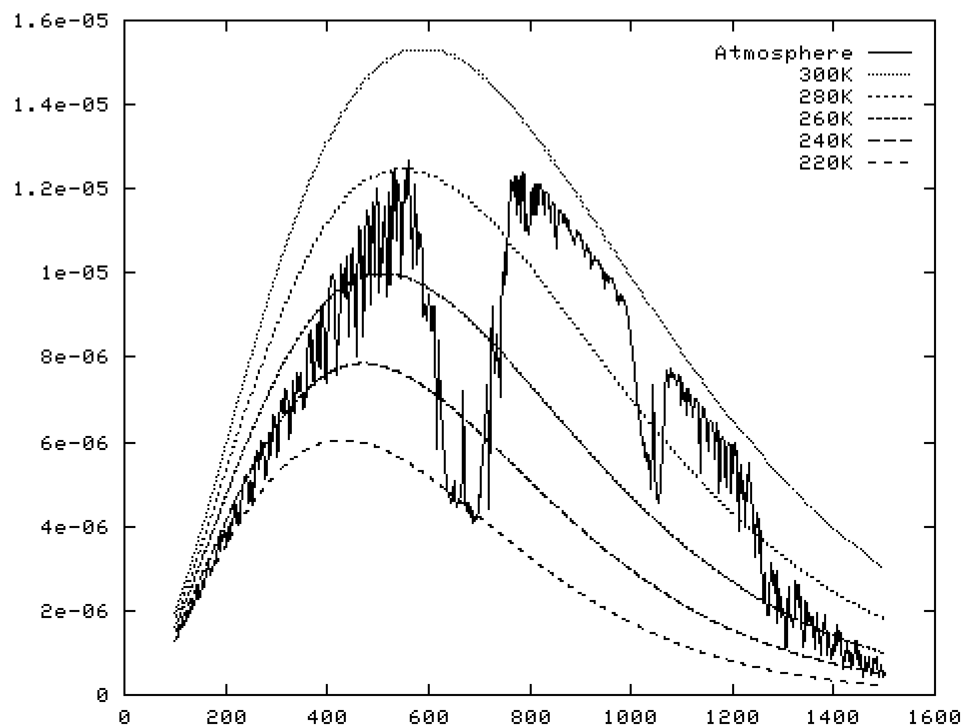
Einfluss von CO_2 und H_2O nach Svante Arrehenius (1898):
Durchlässigkeit einer gegebenen Atmosphäre für einen Körper von 15°C

Table III.—*The Transparency of a given Atmosphere for Heat from a body of* 15° C.

$\rightarrow H_2O$ / $\downarrow CO_2$	0·3.	0·5.	1·0.	1·5.	2·0.	3·0.	4·0.	6·0.	10·0.
1	37·2	35·0	30·7	26·9	23·9	19·3	16·0	10·7	8·9
1·2	34·7	32·7	28·6	25·1	22·2	17·8	14·7	9·7	8·0
1·5	31·5	29·6	25·9	22·6	19·9	15·9	13·0	8·4	6·9
2	27·0	25·3	21·9	19·1	16·7	13·1	10·5	6·6	5·3
2·5	23·5	22·0	19·0	16·6	14·4	11·0	8·7	5·3	4·2
3	20·1	18·8	16·3	14·2	12·3	9·3	7·4	4·2	3·3
4	15·8	14·7	12·7	10·8	9·3	7·1	5·6	3·1	2·0
6	10·9	10·2	8·7	7·3	6·3	4·8	3·7	1·9	0·93
10	6·6	6·1	5·2	4·3	3·5	2·4	1·8	1·0	0·26
20	2·9	2·5	2·2	1·8	1·5	1·0	0·75	0·39	0·07
40	0·88	0·81	0·67	0·56	0·46	0·32	0·24	0·12	0·02

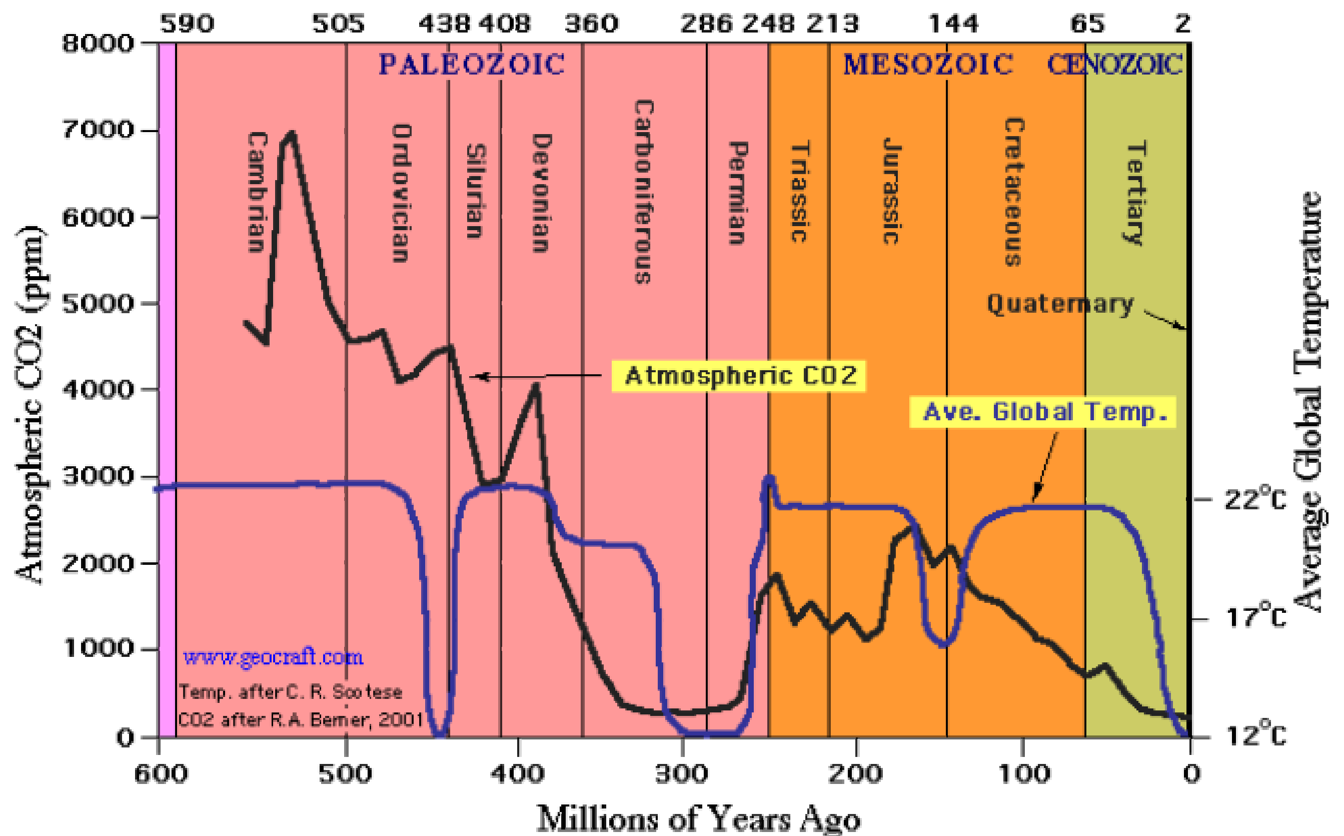
Strahlungsfluss eines Schwarzkörpers bei 299,7 K und 370 ppm CO_2
Absorption bei zwischen Wellenzahl 500 und 900, entspricht der 15µm-Bande
Quelle: http://members.lycos.nl/ErrenWijlens/co2/arrhrev.htm
„Arrhenius was wrong“

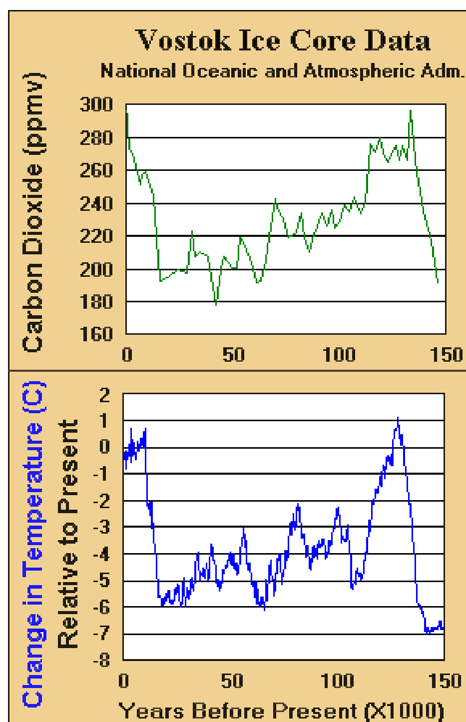
```
[CO2] = 370 ppm
INTEGRATED RADIATION ENERGY FLUX= 287.875W/m2
BOUNDARY TEMPERATURE = 299.70 K
EMISSIVITY = 0.6293
```



CO_2 Gehalt der Erdatmosphäre seit 600 Mill. Jahren
Quelle: www.geocraft.com nach BERNER und SCOTESE
Sie dazu auch Schulbiologiezentrum Hannover GeoGarten

Schwarz: CO2-Gehalt in ppm (heute: 381 ppm)
Blau: Globale Durchschnittstemperatur





Rekonstruktion historischer CO2-Konzentrationen aus Eiskernen

CO2-Gehalt in ppm und Temperaturwerte relativ zur heutigen Globaltemperatur seit 150000 Jahren

Quelle: NOAA